**XLIV Международная молодёжная научная конференция**

# «Гагаринские чтения – 2018»

Сборник тезисов докладов

Том 3

Москва
2018 г.

УДК 629.7.01
ББК 39.53
Г12

Г12 Гагаринские чтения – 2018: XLIV Международная молодёжная научная конференция: Сборник тезисов докладов: М.; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2018.

Мероприятие проводится при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект №18-08-20031

Том 3: М.: Моск. авиационный ин-т (национальный исследовательский университет), 2018. 453 с.

В сборник включены тезисы докладов, представленные в организационный комитет конференции в электронном виде в установленные сроки и отвечающие требованиям. Все доклады напечатаны в редакции авторов.

**ISBN 978-5-90363-170-4**
**978-5-90363-173-5**

**УДК 629.7.01**
**ББК 39.53**

©Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет), 2018

**Участникам и гостям XLIV Международной молодёжной научной конференции «Гагаринские чтения»**

***Дорогие друзья!***

*Мы рады приветствовать вас в числе участников XLIV Международной молодёжной научной конференции «Гагаринские чтения».*

*География участников конференции и их число растут год от года. «Гагаринские чтения» – отличная стартовая площадка для начала пути к новым научным открытиям и инженерным проектам, зарекомендовавшая себя за годы своей работы. Ежегодно, начиная с 1974 года, собираются молодые учёные со всей страны и зарубежья и обсуждают актуальные задачи, стоящие перед высокотехнологичными отраслями промышленности.*

*В МАИ высоко ценятся талант и увлечённость, стремление добиваться успеха и развиваться в науке и исследованиях. Мы искренне надеемся, что гостеприимная площадка МАИ станет для вас символическим разгонным блоком в мир большой науки и великих открытий.*

*Желаю вам и вашим научным руководителям, которые помогают вам строить свой путь в будущее, настойчивости, терпения, интересных задач, удачных творческих решений и больших успехов.*

*Проректор МАИ по научной работе* *Ю. А. Равикович*

Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» — колыбель российской науки, крупнейший в мире центр авиационной науки, которому 1 декабря 2018 года исполняется 100 лет.

Впервые в мировой практике институт объединил фундаментальный научный поиск, прикладные исследования, конструкторские разработки, производство и испытания опытных летательных аппаратов. В ЦАГИ разрабатываются концепции перспективных летательных аппаратов, новые аэродинамические компоновки самолетов и вертолетов, конструктивно-силовые схемы, критерии оценки устойчивости и управляемости летательных аппаратов, стандарты в области прочности, теория флаттера, проводятся фундаментальные и прикладные теоретические и экспериментальные исследования в области авиационной, ракетной и космической техники.

Гордостью института являются комплекс аэродинамических труб и газодинамических установок, уникальные лаборатории статической и динамической прочности, теплопрочностные и акустические камеры, гидродинамические испытательные установки, двигательные и компрессорные стенды, воздушно-энергетические комплексы, а также пилотажные стенды.

Результаты фундаментальных исследований легли в основу определения облика магистральных самолетов нового поколения, представителем которого является МС-21. ЦАГИ с самого старта программы вносил свой вклад в проектирование перспективного лайнера. В рамках программы ученые института реализовали масштабный комплекс исследований и предложили ряд инновационных решений.

(http://www.tsagi.ru/pressroom/news/3098/?sphrase_id=27271)

В настоящее время в ЦАГИ принимает активное участие в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах в смежных отраслях промышленности. В частности, институт выполняет комплексные модельные и натурные испытания по отработке оптимальных форм автомобилей всех типов, железнодорожных составов, поездов метрополитена и аппаратов на воздушной подушке. Исследуются ветровые нагрузки на высотные здания, мосты, крупногабаритные оболочки, ведется поиск экологически оптимальных вариантов застройки городских микрорайонов. Для нефтегазового комплекса страны в ЦАГИ разработаны методики определения остаточного ресурса магистральных трубопроводов и оценки усталости и живучести сварных соединений газопроводов.

Примером внедрения результатов работы ЦАГИ являются монумент Победы на Поклонной горе в Москве, мосты через реки Белая, Обь и Москва.

Многолетняя активная научно-исследовательская деятельность института стала основой для многочисленных достижений и уникальных открытий мирового уровня. (http://www.tsagi.ru)

АО «Объединенная
двигателестроительная корпорация»
Россия, 105118, г. Москва, проспект Буденного, д.16
www.uecrus.com e-mail: info@uecrus.com

ОДК

ВЕРТОЛЕТЫ РОССИИ | МОСКОВСКИЙ ВЕРТОЛЕТНЫЙ ЗАВОД ИМ. М.Л. МИЛЯ

# Оглавление

Направление №5 Ракетные и космические системы ..... 8

Секция №5.1 Механика космического полета и проектно-баллистический анализ летательных аппаратов ..... 8

Секция №5.2 Проектирование летательных аппаратов. Прочность авиационных и ракетно-космических конструкций ..... 16

Секция №5.3 Проектирование и отработка теплонагруженных конструкций ..... 43

Секция №5.4 Анализ и синтез аэрокосмических систем ..... 45

Секция №5.5 Системы жизнеобеспечения и экологическая безопасность космической деятельности ..... 76

Секция №5.6 Эксплуатация и безопасность аэрокосмических систем и комплексов ..... 110

Направление №8 Новые материалы и производственные технологии в области авиационной и ракетно-космической техники ..... 152

Секция №8.1 Перспективные производственные технологии и аддитивные технологии ..... 152

Секция №8.2 Технологии цифрового производства ..... 229

Секция №8.3 Технологические процессы и системы автоматизированного проектирования металлургического производства ..... 252

Секция №8.4 Полимерные и углеродные композиционные материалы, технологии производства изделий из неметаллических материалов ... 292

Секция №8.5 Материаловедение и технология металлических материалов ..... 322

Секция №8.6 Механика и моделирование материалов и технологий .. 366

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ ..... 444

# Направление №5 Ракетные и космические системы

## Секция №5.1 Механика космического полёта и проектно-баллистический анализ летательных аппаратов

### Расчёт среднеквадратических отклонений долготы и периода из-за случайных ошибок при выполнении серии орбитальных коррекций вблизи ГСО

Агишев А.Р.
Научный руководитель — к.т.н. Касаткин В.Г.
МФТИ, Москва
artur.agishev@phystech.edu

Приведение космического аппарата (КА) на заданную долготу стояния геостационарной орбиты (ГСО) и перевод на новую долготу осуществляется по заранее рассчитанным планам, содержащим информацию о величинах и времени выполнения всех коррекций орбиты. Результат таких маневров получается со случайными ошибками, вызванными ошибками измерений параметров орбиты и ошибками исполнения коррекций. Чтобы обеспечить требуемую точность выполнения маневра, необходимы контрольные измерения и дополнительные коррекции, которые следует предусматривать заранее. Для этого полезен расчет статистических характеристик случайных отклонений, возникающих в результате выполнения спланированных коррекций.

В работе предложен метод расчёта среднеквадратических отклонений (СКО) долготы КА и периода его орбиты при завершении манёвра. Исходными данными для расчета являются план трансверсальных и бинормальных коррекций, а также СКО измерения периода и СКО исполнения коррекций. Суммарное отклонение периода орбиты и долготы КА складывается из влияния ошибки измерения периода, ошибок исполнения трансверсальных коррекций и трансверсальных составляющих ошибок бинормальных коррекций. При расчете все ошибки предполагаются независимыми случайными величинами с математическим ожиданием, равным нулю. Конечное отклонение периода определяется как сумма независимых случайных величин. Его СКО вычисляется по теореме сложения дисперсий из СКО измерения периода и СКО всех изменений периода, вызванных ошибками исполнения коррекций по трансверсали. Поскольку число коррекций достаточно велико, отклонения периода орбиты и долготы от заданных значений после выполнения манёвра распределено по закону, близкому к нормальному. Аналогично конечное отклонение долготы складывается из отклонений долготы, вызванных ошибкой измерения периода и ошибками исполнения коррекций. СКО из-за ошибки измерения периода пропорционально СКО измерения периода и длительности маневра. СКО долготы от ошибки отдельно взятой коррекции тоже пропорционально СКО изменения периода из-за такой ошибки, а также интервалу времени между возникновением этой отдельной ошибки коррекции и моментом завершения маневра. Такая зависимость от указанного интервала объясняется изменением скорости дрейфа после очередной коррекции, включающей ошибку. СКО отклонений долготы из-за всех ошибок рассчитываются как СКО суммы независимых случайных отклонений долготы.

Проверка правильности расчёта проводилась имитационным моделированием случайных реализаций корректируемого полёта КА при приведении на долготу стояния и при переводе на новую долготу. Учитывались характерные величины ошибок измерений и исполнения коррекций. Результаты имитационного моделирования подтверждают правильность расчета. СКО по расчету соответствуют с вероятностью 0,99 доверительному интервалу для СКО, найденному по выборке из 50 реализаций. СКО долготы для приведения КА составила 0,9º, для перевода 0,5º. Это на порядок превышает конечные отклонения, полученные в [1] при одинаковых начальных условиях, но без учета ошибок.

Предложенный метод расчета можно использовать при планировании контрольных измерений и завершающих коррекций для обеспечения необходимой точности приведения и перевода КА на ГСО.

Литература

1. Соколов А.В., Улыбышев Ю.П. Многовитковые манёвры с малой тягой в окрестности геостационарной орбиты // Известия Академии наук. Теория и системы управления, 1999. №2. С. 95-100.

## Создание искусственной силы тяжести в космосе на борту космического аппарата

Бабарыкин В.А.
Научный руководитель — доцент, к.ф-м.н. Ручинский В.С.
МАИ, Москва
leshiy.babarikin@yandex.ru

При продолжительных пилотируемых космических полетах может возникнуть необходимость в создании искусственной силы тяжести. Рассматривалось несколько способов создания искусственной силы тяжести. При этом установлено, что предпочтение следует отдать использованию космических тросовых систем. Для сокращения размеров тросовой системы целесообразно использовать режим вращения тросовой системы вокруг центра масс. В целях обеспечения стабильных условий предлагается вращение осуществлять при постоянной угловой скорости. Поддержание постоянной угловой скорости осуществляется регулированием длины троса, соединяющего оба связанных объекта. Связанные объекты подвергаются воздействию силы, равной силе натяжения соединительного троса. Эта сила, по существу, является искусственной силой тяжести.

В работе рассмотрены уравнения относительного движения связанных объектов и получено выражение для закона изменения параметра управления, обеспечивающего вращение тросовой систем с заданной постоянной угловой скоростью. Получены аналитические зависимости, характеризующие изменение искусственной силы тяжести в процессе вращения тросовой системы, а также определены максимальные и минимальные значения ускорения искусственной силы тяжести.

По разработанной методике были проведены расчеты, которые подтвердили ее работоспособность. Установлено, что при вращении тросовой системы в направлении, совпадающем с направлением орбитальной угловой скорости центра масс тросовой системы, значения ускорения искусственной силы тяжести оказываются значительно больше (в среднем в 2 раза) чем при противоположном вращении тросовой системы. Для достижения ускорения порядка десятых долей от наземного ускорения силы тяжести при длине троса 50 км достаточно иметь угловую скорость вращения связки не более чем в 3 раза превышающую орбитальную угловую скорость центра масс тросовой системы, что соответствует достаточно малой угловой скорости порядка 0,003 1/с. При увеличении угловой скорости связки до десятикратного значения орбитальной угловой скорости центра

масс тросовой системы ускорение искусственной силы тяжести достигает значений 7,3-7,7 м/с2, то есть, приближается к ускорению силы тяжести на поверхности Земли.

Литература

1. Иванов В.А., Купреев С.А., Ручинский В.С. Космические тросовые системы: учебное пособие. М.: Альфа-М, 2014. -208 с.

2. Иванов В.А., Купреев С.А., Ручинский В.С. Орбитальное функционирование связанных космических объектов. – М.: Изд-во «ИНФРА-М», 2014. -320 с.

## Исследование структуры локально-оптимальных решений задачи перелета Земля-Марс с электроракетной двигательной установкой

Воробьев А.Л.

Научный руководитель — член-корреспондент, д.т.н. Петухов В.Г.

МАИ, Москва

vorobyev.sasha@gmail.com

Использование маршевой электроракетной двигательной установки (ЭРДУ) даёт возможность значительно сократить затраты рабочего тела, благодаря высокому удельному импульсу, что существенно выделяет ЭРДУ на фоне традиционных ракетных двигателей большой тяги. Однако до сих пор проблемы перелётов космических аппаратов с малой тягой до конца не изучены. Несмотря на усилия большого числа исследователей, до сих пор остается нерешенной задача нахождения глобально-оптимальных решений задач межпланетного перелета космического аппарата с ЭРДУ. В данной работе сделана попытка определения структуры семейств локально-оптимальных решений задачи прямого межпланетного перелета для выявления наиболее оптимальных.

В качестве примера был выбран прямой межпланетный перелёт Земля-Марс с нерегулируемой ЭРДУ в центральном ньютоновском гравитационном поле Солнца. Движение межпланетного КА рассматривается в рамках допущений метода грависфер нулевой протяжённости. Нахождение и оптимизация законов управления (время включения и выключения ЭРДУ и направление вектора тяги) выполнено с помощью принципа максимума Л.С.Понтрягина [1]. Масса рабочего тела ЭРДУ принята в качестве критерия оптимального управления, которая минимизируется. В работе произведён анализ различных схем перелёта, который позволяет выявить связь между локально-оптимальными решениями (экстремалями). Структура таких экстремалей образует различные семейства. Было выявлено, что величина функционала задачи оптимального управления в пространстве основных выбираемых параметров схемы перелета (дата старта и время перелета) образует некоторые поверхности (слои). Особый интерес представляют пересечения этих слоёв, где значения функционала задачи управления являются одинаковыми, при том, что схемы перелёта различные.

Рассмотренные решения дают представление о структуре различных вариантов перелёта, что позволяет выявить наиболее оптимальные решения задачи прямого межпланетного перелета КА с малой тягой.

1. Понтрягин Л. С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1976.

## Проектирование траектории перелета к точке либрации L1 системы «Земля-Луна» космического аппарата с малой тягой

Демьянова А.С.
Научный руководитель — к.т.н. Ельников Р.В.
МАИ, Москва
demyanova_as@mail.ru

В докладе рассматривается задача проектирования траектории перелета космического аппарата (КА), оснащенного маршевой электроракетной двигательной установкой (ЭРДУ) с орбиты КА типа «Спектр-УФ» в кол-линеарную точку либрации L1 системы «Земля-Луна».

Актуальность данной темы обусловлена тем, что точки либрации представляют интерес как для изучения Луны и окололунного простран-ства с помощью автоматических КА, так и для возможной реализации пи-лотируемых экспедиций к Луне.

На начальную орбиту аппарат выводится в качестве попутной полез-ной нагрузки (ПН). В составе ЭРДУ КА используется один холловский ЭРД СПД-108В, масса КА на начальной орбите 370 килограмм.

Траектория КА рассматривается в рамках ограниченной задачи 4-х тел – учитывается гравитационное влияние на траекторию КА от Земли, Луны и Солнца.

Для нахождения эфемерид небесных тел используется DE 405 [1].

При расчете траектории предполагается, что фазовые параметры КА (координаты КА и проекции вектора скорости, а также масса) известны точно, управление (программа ориентации вектора тяги ЭРДУ) реализуется идеально. Для нахождения локально-оптимального управления вектором тяги используется подход, основанный на применении функций Ляпунова.

В результате проведенного исследования получены оценки основных характеристик рассматриваемой транспортной задачи: затраты рабочего тела ЭРДУ, необходимого для перелета, длительность перелета, оценена конечная масса КА и характеристическая скорость маневра. Получены зависимости основных траекторных параметров от времени.

1Standish E. M. JPL planetary and lunar ephemerides, DE405/LE405. Interoffice Memorandum, 1998, 312.F-98-048, 1–18.

## Проектирование перспективных бортовых радиокомплексов космических аппаратов передачи целевой информации

Курасбедиани Р.Г., Литвиненко Е.О., Горчаков С.Ю.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Ламзин В.А.
МАИ, Москва
kurasbediani.roksana@mail.ru

В докладе приведена методика определения обобщенных характеристик бортовых радиокомплексов передачи целевой информации (БРК ЦИ).

При заданных параметрах наземной антенны (диаметру и углу возвышения), высоте орбиты космического аппарата (КА), рабочей частоте передачи определены оптимальные характеристики БРК ЦИ - мощность передающего устройства и коэффициент усиления антенны. Критерий оптимальности - минимальная масса БРК ЦИ.

Для решения поставленной задачи составлена математическая модель БРК ЦИ, разработана блок-схема алгоритма решения.

Были проварьированы различные диаметры передающих антенн, выявлено влияние диаметра передающей антенны на коэффициент усиления, также через уравнение связи – его влияние на мощность передатчика. Была определена зависимость мощности от коэффициента усиления. Построен график этой зависимости. Приведены опытные

(статистические) данные по основным элементам БРК: передатчикам и антеннам. Методом корреляционного и регрессионного анализа были получены приближенные функции зависимостей: массы антенны от коэффициента усиления, а также массы передатчика от его мощности. По методу наименьших квадратов были подобраны функции, наиболее точно описывающие эти зависимости.

При сложении полученных функций, путем нахождения экстремума, были определены оптимальные параметры бортового радиокомплекса.

Полученные данные были отражены в графике зависимости массы бортового радиокомплекса от коэффициента усиления антенны.

На этапе моделирования был проведен анализ влияния диаметра наземной антенны на массу БРК по известным соотношениям. Был получен оптимальный диаметр наземной антенны.

Определено количество каналов связи для передачи ЦИ. В ходе проектирования была вычислена минимальная величина полосы пропускания.

## Определение оптимальных параметров межпланетного перелёта «Земля – Марс»

Луканин М.Ю., Меньшуткин М.А., Алексеев Е.Р.
МАИ, Москва
lmu95@yandex.ru

В данной работе рассматривается процесс проектирования межпланетной траектории «Земля – Марс».

Целью работы является определение оптимальных параметров межпланетного перелёта. Для достижения заданной цели поставлено несколько задач:

1) Определение оптимальной даты старта и времени перелёта (критерием оптимизации является минимизация гиперболического избытка скорости отлёта от Земли);

2) Определение параметров межпланетного перелёта на опорную круговую орбиту Марса;

3) Проверка полученных результатов, при помощи использования различных математических моделей.

Объект изучения - межпланетный перелёт «Земля – Марс». Перелёт осуществляется в рамках задачи о двух тел.

Предмет изучения - математическая модель решения уравнения Ламберта.

В ходе работы были получены следующие значения:

1) Оптимальная дата старта и время перелёта: 15.11.2011 при 252 днях полёта

2) Были получены параметры межпланетного перелёта, а именно параметры двух участков: гелиоцентрический, геоцентрический

3) Был проведён сравнительный анализ различных способов решения уравнения Ламберта

Сравнение проводилось с помощью двух методов: с помощью уравнения Кеплера, и уравнения Эйлера. По результатам расчёта был проведён анализ, который показал что оба метода позволяют с большой точностью описывать межпланетный перелёт. Решение с помощью уравнения Эйлера требует достаточно больше машинного времени для вычисления, поэтому для расчётов рекомендуется использовать уравнение Кеплера. Однако для мощных вычислительных систем эта проблема не существенна.

Составленная математическая модель в программной среде MathCad позволяет в полной мере определить не только минимальный гиперболический избыток скорости, но и параметры межпланетного перелёта. Так же, математическая модель может быть использована для расчётов межпланетных перелётов не только «Земля – Марс», но и к другим планетам, для этого необходимо составить эфемериды планет с расчётом на диапазон требуемых дат старта.

## Проектно-баллистический анализ перспективного космического аппарата «ныряющего» типа для мониторинга окружающей среды

Новосёлов С.А., Салгин Р.Ю.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Ламзин В.А.
МАИ, Москва
sefirot940@gmail.com

В настоящее время актуальной проблемой является получение более качественных снимков поверхности Земли. Это достигается путем совершенствования целевой съёмочной аппаратуры (ЦСА), либо запуском низкоорбитальных спутников с малым сроком активного существования (САС). В докладе рассматривается вариант перспективного космического аппарата (КА) «ныряющего» типа, который имеет возможность изменять свою орбиту, переходя от начальной солнечно-синхронной круговой к промежуточной внутренней. Таким образом данный КА позволяет решать ряд тематических задач.

В процессе функционирования КА на орбите происходит снижение её высоты, в связи с этим необходимо проводить коррекцию орбиты аппарата. Чтобы получить промежуточную орбиту одной лишь ЭРДУ недостаточно, так как она имеет малую тягу. Для решения данной проблемы в докладе рассматривается перспективный вариант её решения – применение комбинированной двигательной установки (ДУ): совокупности ЭРДУ и жидкостного ракетного двигателя (ЖРД).

При заданных САС, количестве включений ЭРДУ и «нырков» необходимо определить рациональные параметры комбинированной ДУ перспективного КА мониторинга окружающей среды, с целью минимизации проектно-массовых характеристик. Для решения данной задачи будет использоваться метод параметрического анализа.

Приведены результаты расчета оптимальных проектно-массовых характеристик, которые показывают возможность создания перспективного КА мониторинга окружающей среды, сочетающий в себе выполнение разных тематических задач при меньшей массе КА и увеличенном функционале. Результаты расчёта могут быть применимы при разработке перспективных космических программ мониторинга окружающей среды.

## Математическая модель оптимальной траектории межорбитального перелета космического аппарата с идеально-регулируемым двигателем

Сое Паинг Туу
Научный руководитель — член-корреспондент, д.т.н. Петухов В.Г.
МАИ, Москва; Мандалай, Мьянма (Бирма)
paingsoethuoo53@gmail.com

Рассматривается задача оптимизации межорбитального перелета космического аппарата (КА) между двумя заданными орбитами в гравитационном поле Земли с учетом возмущений от второй зональной гармоники. Целью оптимизации является расчет программы управления вектором тяги двигателя КА, обеспечивающей такой перелет за заданное время с минимальными затратами топлива. Для решения задачи оптимизации траектории предлагается подход, основанный на использовании принципа максимума Понтрягина.

Как правило, для межорбитальных перелетов используются нерегулируемые двигатели. Тяга и скорость истечения в этом случае имеет постоянное значение, когда двигатель включен. При использовании нерегулируемых двигателей траектория межорбитального перелета формируется программами углов ориентации вектора тяги и программой включения-выключения двигателя. Задача вычисления оптимальной траектории межорбитального перелета с нерегулируемым двигателем малой тяги является достаточно сложной. Одной из проблем является выбор начального приближения для неизвестных

параметров краевой задачи принципа максимума. Для решения этой проблемы предлагается использовать более простую задачу – задачу оптимизации траектории межорбитального перелета КА с идеально-регулируемым двигателем.

В рамках модели идеально-регулируемого двигателя полагается, что задана только механическая мощность реактивной струи (половина произведения тяги на скорость истечения), а значения тяги и скорости истечения, в рамках этого ограничения, могут изменяться произвольным способом. При использовании такой модели двигателя оказывается, что задаче минимизации затрат топлива соответствует задача минимизации интеграла от квадрата реактивного ускорения, а дифференциальное уравнение для массы КА может быть исключено из рассмотрения при оптимизации траектории. При использовании модели идеально-регулируемого двигателя оптимизируемыми программами управления являются программы изменения трех компонент реактивного ускорения от времени. В рамках рассматриваемой модели эти программы являются непрерывными и гладкими функциями времени, что облегчает решение краевой задачи принципа максимума.В работе приводится математическая модель оптимального движения КА с идеально-регулируемым двигателем, включающая функционал, дифференциальные уравнения и краевые условия.

Список литературы

1.Петухов В.Г. Оптимизация межпланетных траекторий космических аппаратов с идеально-регулируемым двигателем методом продолжения. Космические исследования, том 46, № 3, 2008, с. 224-237.

2. Петухов В.Г. Метод продолжения для оптимизации межпланетных траекторий с малой тягой. Космические исследования, т. 50, № 3, 2012, стр. 258 270.

3.Оптимизация траекторий гелиоцентрических перелетов.М.С.Константинов В.Г.Петухов,М.Тейн.

4.Методы оптимизации.Б.Банди

5.Fundamentals of astrodynamics and applications.David A. Vallado

## Расчет двухимпульсной траектории перелета между орбитами вокруг Земли и Луны с учетом основных возмущений

Чжоу Жуи

Научный руководитель — член-корреспондент, д.т.н. Петухов В.Г.

МАИ, Москва; Чэнду, Китай

420790076@qq.com

Тема исследования относится к механике космического полета космических аппаратов. Актуальность темы определяется наличием в ряде стран, включая Россию и КНР, перспективных пилотируемых программ исследования Луны, для реализации которых требуются средства для проведения проектно-баллистического анализа и баллистических расчетов траекторий перелета к Луне.

Рассматриваются двухимпульсные перелеты между круговыми орбитами вокруг Земли и Луны. Первый импульс скорости выдается в некоторой выбираемой точке околоземной орбиты, а второй – при подлете к Луне на минимальное расстояние, равное заданной высоте окололунной орбиты. Во время полета перед первым импульсом, между двумя импульсами и после второго импульса на КА действуют только внешние силы. В рамках рассматриваемой математической модели учитывается притяжение Земли, Луны и Солнца как точечных масс и вторая зональная гармоника геопотенциала.

Рассматривается задача перелета за фиксированное время между круговыми околоземной и окололунной орбитами с заданными высотами и наклонениями. Время выдачи первого импульса скорости считается заданным. Неизвестными параметрами задачи, которые требуется найти для вычисления траектории перелета, являются долгота

восходящего узла начальной околоземной орбиты, аргумент широты точки на этой орбите, в которой прикладывается первый импульс скорости и величина первого импульса скорости. Для минимизации суммарного импульса скорости полагается, что оба импульса скорости – первый, при отлете с околоземной орбиты, и второй, при выведении с траектории перелета на окололунную орбиту – направлены параллельно вектору скорости КА, которую он имеет перед выдачей импульса.

В рассматриваемом случае долгота восходящего узла начальной орбиты и начальный аргумент широты определяют ориентацию вектора геоцентрической скорости КА в начале траектории перелета, а величина этой скорости равна сумме первого импульса скорости и величины скорости на круговой начальной орбите. Значения неизвестных параметров задачи следует выбрать таким образом, чтобы через заданное время перелета КА оказался на заданной высоте над Луной, вектор его скорости относительно Луны был ортогонален вектору селеноцентрического удаления КА, а плоскость определяемая векторами скорости КА относительно Луны и селеноцентрического удаления КА была наклонена на заданный угол к плоскости экватора Луны. Если эти условия выполнены, то второй импульс скорости должен быть направлен против вектора скорости КА относительно Луны, а его величина должна равняться разнице между величиной подлетной скорости до приложения второго импульса и величиной скорости КА на конечной круговой орбите. Для вычисления траектории перелета используется численное интегрирование уравнений возмущенного движения КА между двумя импульсами. Таким образом, задача вычисления траектории перелета сводится к краевой задаче с тремя неизвестными параметрами для системы из шести обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка для геоцентрических координат и компонент скорости КА.

# Секция №5.2 Проектирование летательных аппаратов. Прочность авиационных и ракетно-космических конструкций

## Формирование опорного облика гиперзвуковой крылатой ракеты

Ахметов С.Н.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Гусейнов А.Б.
МАИ, Москва
serik-akhmetov@yandex.ru

Актуальность темы нашей работы определяется тем, что в настоящее время военно-техническое превосходство над вероятным противником в современных условиях может быть обеспеченно путём создания высокоточных ракетных систем и комплексов оружия воздушного, морского и наземного базирования. Они могут быть использованы для нанесения ударов в любых по масштабу (локальных, региональных, международных) и применяемому оружию (обычного, ядерного) военных конфликтах[1].

В последние годы дозвуковые и сверхзвуковые крылатые ракеты, становятся менее эффективнее из-за развития систем противовоздушной и противоракетной обороны (ПВО и ПРО), в следствии увеличения возможностей зенитно-управляемы ракет и более развитой системой слежения за воздушным пространством. В связи с этим основной целью работы является разработка гиперзвуковой крылатой ракеты (ГКР), которая сможет на большой скорости и большой высоте пройти системы ПВО и ПРО, оставаясь, как можно дольше, незамеченной для систем слежения. В следствии этого время на развёртывание систем ПВО и ПРО останется меньше.

Разработка ГКР находится на стадии исследования и её разработкой занимаются во многих странах, а именно США, Россия, Китай, Индия и страны Евросоюза.

В данной работе были сформированы требования к ГКР в соответствии с необходимыми условиями для прохождения систем ПВО и ПРО вероятного противника, а именно:

- маршевая скорость полёта – 6 и более Маха;
- маршевая высота полёта – 30 – 40 км (диапазон высот на которых не работаю системы ПВО (до 27км) и ПРО (более 40 км));
- дальность полёта – более 1000 км (до входа носителем в зону действия систем ПВО и ПРО).

В соответствии с этими требованиями был проведён анализ разрабатываемых, в настоящее время, гиперзвуковых летательных аппаратов для проработки концепции и формирования опорного облика. В соответствии с требованиями и концепции к ГКР были выбраны и обоснованы: аэродинамическая схема («волнолёт»), двигательная установка (гиперзвуковой прямоточно-воздушный ракетный двигатель(ГПВРД)), применяемое топливо(углеводороды), и основные бортовые системы.

В ходе работы выявили следующие проблемы, связанные с проектированием ГКР, а именно:

- формирование интегральной компоновки ГПВРД под корпусом таким образом, чтобы нижняя поверхность планера использовалась в качестве поверхности сжатия и расширения потока;
- создание ГПВРД, со сверхзвуковым горением в камере сгорания;
- необходимость применения жаростойкий сплавов и теплоизоляционных покрытий, в следствии высоких температур, действующих на ГКР;
- снижение инфракрасной заметности.

В результате проведённой работы был сформирован опорный облик гиперзвуковой крылатой ракеты способной на большой скорости пройти системы ПРО вероятного противника, тем самым уменьшить время реагирования на развёртывания этих систем.

1. Беспилотные летательные аппараты. Основы устройства и функционирования. /П.П. Афанасьев, И.С. Голубев, В.Н. Новиков, С.Г. Парафесь, М.Д. Пестов, И.К. Туркин / Под редакцией И.С. Голубева и И.К. Туркина. - Изд. второе, переработанное и дополненное. - М.: 2008. - 656 с.: ил.

## Статистическая оценка устойчивости движения беспилотного летательного аппарата (БЛА)

Бородин И.Д.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Балык В.М.
МАИ, Москва
iibbdd@yandex.ru

Целью работы является исследование устойчивости движения, управляемого беспилотного летательного аппарата (БЛА). Устойчивость рассматривается по отношению к возмущающим факторам искусственного типа. Работа состоит из трёх этапов.

На первом этапе устойчивость движения БЛА анализируется классическим способом - при помощи подбора функции Ляпунова. Функция Ляпунова это скалярная функция, которая используется, если имеется система обыкновенных дифференциальных уравнений и необходимо исследовать устойчивость их решений с помощью второго (прямого) метода Ляпунова. Так как движение БЛА в рассматриваемой упрощенной задаче состоит из 7-ми обыкновенных дифференциальных уравнений, то функция Ляпунова записывается относительно 7-ми фазовых переменных.

На втором этапе функция Ляпунова строится при помощи разработанного статистического метода.

На третьем этапе определяется правильность функции Ляпунова, разработанной статистическим методом. Для определения правильности решений была разработана программа (script файл) в системе MatLab. Данная программа представляет собой траекторную модель движения противокорабельной ракеты «Яхонт» (ПКР «Яхонт»).

Проведенные численные эксперименты показали устойчивость БЛА по отношению к неконтролируемым факторам связанных с целью, таких как: скорость цели, начальные координаты цели, курс цели.

Список использованных источников:

1. Барбашин Е. А. Функции Ляпунова. М.: Изд-во «Наука», 1970.
2. Тарасов Е. В., Балык В. М. Методы проектирования летательных аппаратов. М.: Изд-во МАИ, 2000.

## Разработка элементов механизации аэродинамичской тормозной системы применительно к перспективным многоразовым космическим системам класса «несущий корпус»

Варады Г.К.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Мельничук В.Н.
МАИ, Москва
germanvarady@yandex.ru

Обозримое будущее все сильней и сильней навязывает нам новую космическую гонку, отказ от которой грозит полной потерей инициативы в освоении космического пространства

и создании космической инфраструктуры. Космическая техника будущего должна соответствовать не только требованиям надежности и мощности, но и экономической эффективности и многофункциональности. Работа посвящена частичному решению данной проблемы.

Основными задачами исследования являлись:

- выявление наиболее перспективной, из существующих, конструктивной схемы многоразовой космической системы;
- создание агрегатов аэродинамического торможения для выбранной схемы;
- увеличение количества элементов конструкции подлежащих многоразовому использованию;

В работе был проведен анализ всех существующих и перспективных, на данный момент, классов спускаемых аппаратов. Выявлен наиболее перспективный из них – «несущий корпус». Данный класс космических систем отлично вписывается в традиционную проектно-компоновочную схему транспортного космического корабля.

Внедрение разработанного агрегата аэродинамического торможения очень благоприятно скажется на рассматриваемом классе космических аппаратов. Благодаря введению активной тормозной системы, сильно улучшатся его аэродинамические и маневровые характеристики на участке выравнивания и посадки. Станет возможным проведение маневров по углу рыскания, тангажа и крена. Улучшение аэродинамических характеристик позволит избежать дополнительных перегрузок в атмосферном участке полета, что, в свою очередь сделает возможным создание экипажей из людей, физически менее подготовленных, чем космонавтов, открыв широкие перспективы для космического туризма. Увеличение коэффициента многоразовости использования повысит экономическую эффективность рассматриваемой космической системы.

## Использование морфологического подхода при проектировании РКК

Викулин Н.А.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Ревенков А.В.
МАИ, Москва
nik.vikulin@mail.ru

Во многих сложных проектах на ранних этапах их разработки возникают задачи выбора проектных решений и проведение количественной оценки возможных вариантов. Сделать это в полной мере ответственному лицу не всегда предоставляется возможным. Поэтому к работе привлекаются эксперты, которые проводят так называемую экспертную оценку.

В этой работе предпринята попытка использовать морфологический подход при проведении экспертного анализа сложных проектов. При этом результаты экспертизы обрабатывались посредством относительно простого математического аппарата, последовательность работы которого тоже была разработана в данной работе.

Была решена задача по выбору оптимальной формы варианта представления результатов анализа лицу, принимающему решение (ЛПР).

Для решения задачи был использован пример выбора облика системы ракетно-космического комплекса (РКК), который обеспечивал бы вывод на требуемый диапазон орбит летательных аппаратов (ЛА) потребной массы.

Сама задача сводилась к выполнению следующих этапов:

1) Все возможные варианты решений представлялись в виде морфологических таблиц;
2) Основная задача разбивалась на несколько подзадач;
3) Проводилось ознакомление экспертов с заданием;
4) Решался вопрос о том, как будут обрабатываться результаты опроса;

5) Разрабатывалась форма представления результатов анализа ЛПР.

Результатом работы явились рекомендации, которые дают представление о том, в какой последовательности необходимо проводить экспертизу и в каких областях на практике их целесообразно использовать.

## Методика выбора проектного облика ракеты-носителя

Винничук С.В.
Научный руководитель — к.т.н. Титов Д.М.
МАИ, Москва
ya.vinni03@yandex.ru

За всё существование ракетно-космической отрасли была создана большая номенклатура ракет-носителей (РН), которые, с одной стороны похожи, имели схожие подходы к проектированию (одну и туже цель вывести полезный груз на орбиту), а с другой стороны, углубляясь в детали, имеют абсолютно различные конструктивно-технологические решения и, по-своему, каждая РН является уникальной.

Так, в некоторых случаях, при создании РН инженеры стремились улучшить массовый критерий эффективности, за счёт увеличения плотности компоновки и использования сложных, но эффективных конструкторских решений, в другой же заботились об удешевлении технологических процессов и их упрощении. Увеличение плотности компоновки усложняет технологическую сборку и усложняет технологический процесс в целом. В определённых случаях стоит пренебречь экономией массы в пару процентов, в пользу упрощения и удешевления технологии.

В настоящее время сформировались требования рынка космических услуг по актуализации запуска космических аппаратов классов «микро» и «нано», что, в свою очередь, определяет требования и к средствам выведения.

Носитель для выведения такого класса КА, в настоящее время, существует только в Японии (SS-520). Однако он был создан на базе уже имеющейся метеорологической ракеты, а, значит, подход при проведении проектно-конструкторских задач был прежним.

Для создания РН сверхлёгкого класса требуется создать методику, которая будет:

1) формировать и обосновывать критерии эффективности РН данного класса;

2) сравнивать различные компоновочные схемы и позволит инженеру оценивать целесообразно ли создавать и внедрять новые технологические процессы ради уменьшения массы.

Методика заключается в следующем. Из проектных параметров, а конкретнее: вид компонентов топлива, плотность топлива, масса топлива, двигатель, габариты двигателя, тяга, диаметр миделя ракеты, давление наддува в баке, осевая нагрузка, осевая перегрузка и т.д. формируется компоновочные схемы. Данные отдельно рассматриваются и подробно анализируются. По каждой схеме создаётся массовая и геометрическая сводка. Аналитически и эмпирически выводятся наилучшие сочетания конструкционных решений для определённых проектных параметров. В конце проводится сравнение критериев эффективности, которое поможет инженеру выбрать проектный облик РН.

Это позволит на этапе проектирования учитывать не только проектные параметры, но и рассматривать конструкторские, технологические, экономические и иные требования и ограничения при производстве РН. Актуальность данной работы заключается в необходимости создания методики для сокращения времени цикла по созданию современной и перспективной РН.

## Использование электронной спекл-интерферометрии при исследовании НДС элементов авиаконструкций

Вэй Хлэйн, Тун Мин Лат, Ньян Мин Хтет
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Волков И.В.
МФТИ, Долгопрудный
lovecreator05@gmail.com

Использование ЭСИ является важным и перспективным методом исследования НДС авиаконструкций с выявлением зон концентрации напряжений.

По сравнению с классической голографией в этом методе требования к разрешающей способности регистрирующей среды являются более низкими. Это связано с требованием обеспечения лишь разрешения спекл структуры. Типичные минимальные размеры спеклов лежат в пределах 5-100 мкм и, следовательно, для записи спекл структуры можно использовать стандартную телекамеру. Таким образом, для получения картины спекл-корреляционных полос наряду со спекл-фотографией можно в равной мере использовать и видеозапись. Этот метод называют электронной спекл-интерферометрией (ЭСИ). Важная отличительная особенность метода ЭСИ состоит в том, что он позволяет выводить динамическую картину корреляционных полос прямо на экран дисплея, минуя фотозапись. Однако до вывода на экран корреляционных полос, необходимо произвести вычитание, либо сложение, либо Фурье преобразование и фильтрацию на определенной пространственной частоте оптических спекл полей.

Относительная простота этого метода позволяет применить метод корреляционной интерферометрии к решению существенно более сложных задач, связанных с определением формы поверхности, шероховатости, либо с экспериментальной механикой определения напряженно- деформированного состояния поверхности нагружаемого объекта или его виброметрии. Процедура определения корреляции интенсивностей в ЭСИ осуществляется с помощью сложения (наложения видеосигналов) и вычитания видеосигналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1.Волков И.В. Спекл-голография в экспериментальной механике.Изд-во Пензенской гос. технологической академии.-2010.- 199с.

2.Волков И.В. Внестендоваяспекл-голография. Использование голографической и спекл-интерферометрии при измерении деформаций натурных конструкций. [Текст] / Компьютерная Оптика.-2010, т. 34.-№1 с.82-89.

## Анализ возможностей использования межорбитальных транспортных аппаратов малой тяги

Глинкин С.Ю.
МАИ, Москва
seriy12a@gmail.com

При выведении космических аппаратов на высокие (эллиптические, круговые) орбиты и на отлетные межпланетные траектории требуется обеспечение выполнения энергозатратных динамических маневров. Использующиеся для этих целей разгонные блоки имеют ограниченную эффективность, являются достаточно дорогостоящими и, фактически, одноразовыми, применяемые двигатели ЖРД, обеспечивают ограниченное количество включений, что уменьшает возможности многоразового применения космических систем.

Одно из возможных решений этой проблемы – применение специализированных межорбитальных транспортных аппаратов (МТА) для выполнения операций межорбитальной транспортировки.

Основной задачей разработки МТА может являться стыковка с ранее выведенными при помощи существующих ракет-носителей (РН) целевых космических полезных нагрузок (космических аппаратов) и доставка их на рабочие орбиты-цели. МТА должен, во-первых, обеспечивать длительные сроки активного существования (САС) и многоразовое функционирование в условиях космического полета; во-вторых, иметь возможность обеспечения локальных транспортных операций для различных типов полезных грузов; в-третьих – обеспечивать возможности выполнения транспортных операций до геостационарной и окололунных орбит.

Предлагаемые варианты проектных решений МТА обеспечивают многоразовое использование, дозаправку на базовой околоземной орбите и способны существенно снизить затраты на выведение целевых полезных грузов на высокие рабочие орбиты, а также увеличить допустимую массу полезных грузов как при односторонней транспортировке, так и при выполнении обратных транспортных операций.

Для решения этих задач МТА должен иметь двигательную установку малой тяги с высоким удельным импульсом, рассматриваются варианты применения двигателей типа СПД (СПД-140 и др.). Планируется выведение МТА с поверхности Земли с использованием существующих РН, минимальный срок активного существования МТА – 15 лет. Масса полезного груза – до 25 т (для окололунной орбиты) с возвращением МТА на низкую околоземную орбиту базирования.

## Гексакоптер с электроприводом для исследования Марса

Давыдов П.К.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Артамонов Б.Л.
МАИ, Москва
haf0@yandex.ru

Марс, представляет огромный интерес для человечества, как в плане демографического вопроса так и исследовательского.

На сегодняшний день исследовательские миссии с помощью марсоходов на Марсе ограничены в перемещении. При планировании миссии ученые вынуждены заранее выбирать место посадки таким образом, чтобы сесть в наиболее интересном районе, поскольку марсоходы передвигаются очень медленно. Curiosity, например, более чем за 4,5 года работы проехал 16 километров, при этом его колеса уже начали разрушаться и при неблагоприятном сценарии они могут полностью разрушиться уже через восемь километров.

Целесообразнее использовать для этого дистанционно-управляемые мультикоптеры, способные перемещаться в атмосфере Марса, и выполнять исследовательские функции на удалении до 20 км от точки базирования.

Такой аппарат способен выполнять следующие задачи:

1. Поиск мест для приземления космических аппаратов с помощью фотосъёмки.

2.Детальное исследование поверхности, для составления оптимального курса марсоходов. С помощью современных технологий, можно составить 3D карту поверхности, имея локальные изображения.

3. Изучение поверхности для дальнейшего исследования сыпучих пород и металлов, вроде железа и алюминия.

4. Поиск источника метана, выбросы которого зарегистрированы одновременно американскими и российскими астрономами.

При проектировании летательного аппарата были учтены следующие условия летательного аппарата в атмосфере Марса:

- плотность атмосферы 0.02 кг/м3;
- температурные условия от -130 до +30 градусов по Цельсию;

- ускорение свободного падения 3.71 м/с2;
- скорость звука 244 м/с;

Исследования показали, что из-за низкой плотности атмосферы Марса оптимальной конструкцией летательного аппарата является мультикоптер. За счёт использования большого количества несущих винтов можно получить необходимую подъёмную силу при ограниченной мощности силовой установки. Поскольку проектируемый летательный аппарат является беспилотным, то полёт происходит по заранее заданной программе из-за большой временной задержки при отправке радиосообщений на Землю и обратно. Радиосигнал до Марса идет от 4 до 24 минут в зависимости от взаимного расположения планет, и это только в одну сторону.

Беспилотный летательный аппарат забрасывается на Марс вместе со стационарной платформой, которая после приземления выровняется за счёт подвижных упоров, обеспечивая горизонтальное положение посадочной панели. Неподвижная платформа имеет аккумуляторы, которые постоянно подзаряжаются от установленных на ней солнечных батарей. Запасённая энергия передаётся аккумуляторам мультикоптера, в объёме необходимом для выполнения полёта. Платформа передаёт данные, полученные от мультикоптера, на Землю после завершения полёта.

За прототип взята посадочная платформа, которая является частью космического аппарата Экзомарс 2020. Для адаптации платформы под мультикоптер, убраны полозья для съезда марсохода с платформы и добавлен разъём для подзарядки летательного аппарата и передачи полученной информации на Землю.

При проектировании аппарата учитывались характеристики имеющихся электродвигателей и аккумуляторные батареи способные работать в условиях Марса. Показано, что оптимальным вариантом мультикоптера является гексакоптер с шестью несущими винтами. Предлагаемый гексакоптер имеет следующие параметры:

1) диаметр винта - 0.98 м ;
2) коэффициент заполнение винта - 0.2;
3) рабочие обороты - 2 483 об/мин;
4) окружная скорость концов лопастей винта - 124.9 м/с;
5) число Маха в концевом сечении лопасти - 0.5 ;
6) угол установки в характерном сечении лопасти винта - 25.9 градусов;
7) КПД винта - 0.8;
8) сила тяги одного винта - 11.1 Н;
9) сила тока - 10.9 А ;
10) потребляемая мощность одного винта - 525.1 Вт.

Разработан алгоритм расчёта аэродинамических характеристик винтомоторной группы с выбранными параметрами при управлении рабочими оборотами винта, напряжением передаваемым на электродвигатель.

Для расчёта балансировки гексакоптера разработана математическая модель, с помощью которой методом численного интегрирования можно рассчитать аэродинамические характеристики жесткого винта фиксированной геометрии, находящегося под определённым углом атаки по отношению к вектору скорости набегающего потока при различных окружных скоростях винта. Модель основана на квазилинейной дисковой вихревой теории винта профессора В.И.Шайдакова

Система уравнений продольной балансировки в общем случае является нелинейной и решается на ЭВМ методом последовательных приближений. Для обеспечения устойчивости и приемлемых законов управления гексакоптером на нём установлен стабилизатор под фиксированным углом.

Показано, что проектируемый мультикоптер способен поднимать массу коммерческой нагрузки в 1 кг при марсианских условиях, имеет статический потолок 600 метров, динамический 1500 м, максимальную скорость горизонтального полёта 165 км/ч. Время полёта составляет 27 минут, при взлётной массе гексакоптера 15 кг.

## Разработка проектных решений космических аппаратов для защиты Земли от астероидно-кометной опасности

Демин Г.Р., Войцицкая Э.П.
Научный руководитель — Тузиков С.А.
МАИ, Москва
gregorydemin@yandex.ru

Предлагаются схемные проектные решения космических аппаратов, предназначенных для защиты Земли от астероидно-кометной опасности (АКО).

В качестве прототипов анализируются технические решения, предлагаемые в рамках проекта защиты от АКО "Цитадель" и аналоги космических аппаратов.

Рассматриваются варианты перспективных космических аппаратов, обеспечивающих систему функций анализа траектории опасных объектов. Предлагаемые универсальные космические аппараты целевого назначения обеспечивают возможности определения траекторий движения потенциальных космических угроз.

После обнаружения потенциально опасного небесного тела к наблюдению подключатся средства наземного и космического базирования, в зоны видимости которых этот объект будет попадать. На основе получаемой информации на Земле оценивают степень опасности (место и время предполагаемого падения) и разрабатывают комплекс мер по ее предотвращению. После согласования плана мероприятий на международном уровне запускают два КА-разведчика и, по крайней мере, два КА-перехватчика.

Результаты наблюдений при пролете КА-разведчиков вблизи небесного тела позволят уточнить его траекторию, размеры, массу и другие характеристики. Предлагаемый проект разведчика состоит из двух частей: основной и посадочного маяка. Пролетая мимо астероида, разведчик десантирует на него небольшой аппарат, снабжённый радиостанцией для излучения сигнала, и, при необходимости, другими системами.

На основе полученных данных разработают инженерную модель астероида и уточнят его траекторию, что обеспечит точность наведения КА-перехватчиков. При подрыве зарядов небесное тело отклонится от траектории, направленной к Земле, или разрушится.

Космические аппараты разведывательной группировки могут быть использованы для решения научно-исследовательских, транспортных и других прикладных задач в космическом пространстве.

## Нейросетевое прогнозирование характеристик летательного аппарата

Дзядзько А.В., Селявина М.П.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Балык В.М.
МАИ, Москва
demantick@mail.ru

В процессе прогнозирования характеристик сложной технической системы, в частности, летательного аппарата, необходимо решать две сложные задачи. Во-первых, необходимо выбрать класс базисных функций, в которых будет осуществляться прогнозирование характеристик технической системы (т.е. необходимо выбрать прогнозирующий полином). Во-вторых, необходимо задать вид критерия оптимальности, по которому осуществляется прогнозирование. Эффективное решение таких задач можно получить с помощью применения нейросетевого прогнозирования. В нейросети аналогом прогнозирующего полинома является функция активации нейрости. В качестве такой функции принята логистическая функция. Критерием оптимальности прогноза является среднеквадратическая ошибка между данными полученными по прогнозирующему полиному и табличными данными. В силу того, что нейроны, находящиеся на промежуточных слоях нейросети,

связаны между собой межнейронными связями, прогнозирующий полином будет представлять собой сложную комбинацию, состоящую из функций активации.

В работе была решена задача прогнозирования стоимости ЛА в зависимости от времени прогноза. Прогноз осуществлялся подстановкой прогнозируемых дат в обучающую выборку. В целом в работе была разработана технология работы с нейросетью при решении задач прогнозирования.

In the process of predicting the characteristics of a complex technical system, in particular, an aircraft, two difficult tasks must be solved. First, it is necessary to choose a class of basic functions in which the forecasting of the technical system's characteristics will be carried out (ie, it is necessary to choose a predictive polynomial). Secondly, it is necessary to specify the kind of criterion of optimality, by which forecasting is carried out. An effective solution of such problems can be obtained by using neural network prediction. In the neural network, the analogue of the predictive polynomial is the function of activation of the neuroticity. As such a function, a logistic function is adopted. The criterion of optimality of the forecast is the mean square error between the data obtained from the predictive polynomial and the tabulated data. Due to the fact that the neurons located on the intermediate layers of the neural network are interconnected by inter-neural connections, the predictive polynomial will be a complex combination consisting of activation functions.

In work the problem of forecasting of cost of aircraft in dependence on time of the forecast has been solved. The forecast was carried out by substituting the forecasted dates in the training sample. In general, the work has developed a technology for working with a neural network in solving prediction problems.

## Оценка возможностей по унификации топливных дозаторов в авиационной и ракетно-космической технике

Дюстер А.А.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Гончар А.Г.
МАИ, Москва
S.d-94@mail.ru

В современном мире практически любая крупномасштабная социально-экономическая, научная или оборонная программа уже не может быть эффективно реализована без применения результатов функционирования ракетно-космической и авиационной промышленности.

Авиационная и ракетно-космическая промышленность являются наукоемкими высокотехнологичными отраслями, требующими серьёзных научно-технических разработок и больших капиталовложений. Высокая наукоёмкость производственного процесса обусловлена сложностью продукции, которая выпускается в небольших количествах. А высокая степень капиталоёмкости отраслей определяет её высокую монополизацию.

Таким образом, особенностью данных отраслей являются высокие требования к надёжности и безопасности изделий и составных частей.

Одним из направлений повышения надёжности технических устройств является унификация.

Целью исследования являлось оценивание возможностей по повышению тактико-технических характеристик, эксплуатационных свойств и надежности авиационной и ракетно-космической техники путем унификации используемых в них элементов гидроприводов.

В проведенной автором исследовательской работе были рассмотрены три дозирующие установки: дозатор топлива основной камеры сгорания и дозатор топлива форсажной камеры сгорания, используемые в авиационных двигателях, и высокоточная дозирующая

установка, применяемая в системе заправки на стартовом комплексе. Затем был проведен сравнительный анализ характеристик дозаторов: входного давления, расхода, рабочей температуры, массы агрегатов, погрешности дозирования и показателей качества. По их результатам дана оценка о невозможности унификации рассмотренных авиационных топливных дозаторов путём их применения в ракетно-космической технике.

Данный вывод, однако, не снижает актуальности решения задач по унификации элементов, используемых в авиационной и ракетно-космической технике.

В дальнейшем данная работа может быть использована при разработке проектов в ракетно-космической отрасли, в которых планируется использование гидроприводов.

## Анализ динамической устойчивости конической оболочки ЛА при комплексном термосиловом нагружении

Егошин Е.О.
Научный руководитель — профессор, к.т.н. Туркин И.К.
МАИ, Москва
egoshinee@mail.ru

В работе анализируется динамическая устойчивость тонкостенной неподкреплённой конической оболочки ЛА при комплексном термосиловом нагружении.

В качестве математической модели использовались уравнения движения элемента оболочки в проекции на нормаль к образующей и уравнения совместности деформации для неподкреплённой оболочки. Учёт температурных усилий в осевом, окружном и касательном направлениях в этих уравнениях проведён на основе работ [1,2].

Решение системы дифференциальных уравнений осуществлялось в тригонометрических рядах относительно прогиба оболочки. В результате интегрирования дифференциальных уравнений с помощью метода Бубнова-Галеркина, получено основное дифференциальное уравнение, устанавливающее зависимость между параметрами прогиба и изменяющейся во времени осевой нагрузкой. Граничные условия в исследовании соответствуют шарнирному закреплению оболочки, в качестве допущений принимаются соотношения Кирхгофа-Лява, материал оболочки изотропный. Прикладывалась сжимающая нагрузка пропорциональная времени при постоянном тепловом воздействии.

Численное решение основного дифференциального уравнения позволило оценить влияние термосилового нагружения на динамическую устойчивость конической оболочки. Анализ результатов показал, что с ростом скорости нагружения число волн и время начала потери устойчивости оболочки увеличиваются. На основе исследований, проведённых в данной работе появляется возможность анализировать несущую способность конических оболочек ЛА. Это позволит анализировать конструкцию головных обтекателей и хвостовых отсеков при их проектировании. Для сравнения результатов, была построена модель в программной среде Ansis.

Литература

1. Агамиров В.Л. Динамические задачи нелиненой теории оболочек.
-М.: Наука,1990.-272 с.
2. Огибалов П.М., Грибанов В.Ф. Термоустойчивость пластин и оболочек.
-М.: Изд-во МГУ, 1968.-520 с.
3. Парафесь С.Г., Туркин И.К. Актуальные задачи аэроупругости и динамики конструкций высокоманевренных беспилотных летательных аппаратов.-М.: Изд-во МАИ, 2016.-184 с.

## Многоразовый транспортный космический корабль с аэродинамически несущим корпусом

Карнаухов С.Д.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Зотов А.А.
МАИ, Москва
karnaukhov_stanislav@mail.ru

Многоразовый транспортный космический корабль (МТКК) нового поколения должен обладать преимуществами перед существующими транспортными космическими аппаратами капсульного типа («Союз»), а также крылатого типа («Спейс Шаттл», «Буран»). Во-первых должна быть снижена величина затрат на их эксплуатацию, повышена надежность и безопасность эксплуатации, повышена относительная масса полезного груза, обеспечен более широкий маневр по боковой дальности полета при спуске с орбиты, что позволяет расширить диапазон возможных траекторий возвращения. Наконец, должна быть обеспечена самолетная посадка с высокой степенью безопасности,

Предлагаемая форма аэродинамически несущего корпуса МТКК в виде эллипсоида с плоской нижней поверхностью, большая ось которого (в плане) расположена вдоль вектора набегающего потока, а малая ось эллипса - перпендикулярна к вектору набегающего потока, позволяет обеспечить, при наличии аэродинамических органов стабилизации, довольно высокое аэродинамическое качество на дозвуковых режимах полета при посадке (kдоз = 5-7), что очень важно при самолетной посадке таких МТКК.

Проведенные расчеты, продувки в аэродинамической трубе и летные испытания радиоуправляемой модели дают основание для оптимистичной оценки предложенной концепции.

При реализации мер, направленных на улучшение аэродинамических характеристик и повышения безопасности полета таких аппаратов на всех режимах (в том числе и при посадке на аэродромную полосу) за счет дублирования органов стабилизации и управления, использования энергетических способов увеличения коэффициента подъемной силы за счет тангенциального выдува струй сжатого воздуха (газа) на верхней поверхности корпуса и др., предложенная геометрическая форма «несущего корпуса» обеспечит надежную и безопасную посадку МТКК на аэродромную полосу, при этом скорость при посадке не будет превышать посадочную скорость современных транспортных самолетов.

Одним из главных обобщенных аэродинамических параметров, характеризующих аэродинамическое совершенство геометрической конфигурации космического корабля, является коэффициент аэродинамического качества на гиперзвуковом режиме полета. Для крылатых космических кораблей типа «Спейс Шаттл» и «Буран» коэффициент качества на гиперзвуке достигает величины kгип $\approx$ 1 …2.0. Результаты расчета первичной модели предложенной нами схемы аэродинамически несущего корпуса показали близкое аэродинамическое качество на гиперзвуке (при $M\infty \geq 5$) kгип = 1.5-1.9.

## Исследование надежности систем технического комплекса РН с применением логико-вероятностных методов

Коркина Е.С., Алексеева Н.Н.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Палешкин А.В.
МАИ, Москва
elenakorkina_1992@mail.ru

Разработка математических моделей сложных технических систем на основе анализа логико-вероятностных методов и моделей на данный момент является перспективным направлением.

В процессе выполнения работы на основе анализа функционирования системы подачи сжатых газов на технической позиции ракеты-носителя определена функция работоспособности, с помощью которой записано условие работоспособности и заданы требования к надежности системы подачи сжатых газов.

Система подачи сжатых газов (СПСГ) является сложной технической системой с наличием большого количества функциональных связей и элементов. Для систем такого типа проведение экспериментальной отработки не представляется возможным, поэтому в процессе исследования и изучения надежности используют математические модели. Разработанная модель такой системы дает возможность выявить причины возможных отказов и дефектов системы, составить перечень критических элементов, оценить надежность узлов и системы в целом, при необходимости разработать программу повышения надежности и проконтролировать ход ее выполнения.

Разработана функциональная схема СПГС, учитывающая взаимосвязь между элементами, узлами и системами и возможностью резервирования.

На основе анализа функционирования системы разработано дерево отказов и составлена вероятностная функция. Проведен анализ структурной схемы надежности и дерева отказов СПСГ, составлена функция отказа СПСГ с помощью функций алгебры логики.

Математическая модель работоспособности СПСГ позволяет оценить степень участия каждого из элементов в общей характеристике системы. Определение важности отдельных элементов системы необходимо для решения таких задач, как поиск неисправностей, разработки оптимального резервирования, распределения требований по показателям надёжности. Оценивая относительные усилия по поддержанию надежности узлов для обеспечения необходимой надежности системы, нужно знать, какой узел более весомый, какой – менее значимый.

Результатом работы является математическая модель надежности СПСГ технического комплекса ракеты космического назначения с возможностью восстановления работоспособного и исправного состояния после возникновения отказа или неисправности в процессе выполнения работ.

## Разработка проектного облика универсального модульного летательного аппарата для исследования Марса

Курбанов Якуб
Научный руководитель — Тузиков С.А.
МАИ, Москва
ace194@mail.ru

В настоящее время одним из актуальных направлений развития летательных аппаратов (ЛА) является разработка ЛА, способных совершать длительные полеты на больших высотах. К таким аппаратам можно отнести Aquila [1]. Основными целями разработки и создания ЛА такого типа являются, в том числе, создание методов и технических средств обеспечения прецизионного зондирования Земли, обеспечение связи и навигации для различных районов земной поверхности [2]. Интересными проектами являются: аппараты: Solar Impulse, продемонстрировавший возможность осуществления кругосветного путешествия без затрат топлива, ЛА Helios, который достиг высоты 33 километра [3],[4].

В представленной работе рассматриваются проблемы разработки ЛА, предназначенного для исследования Марса, основными источниками которого являются преобразователи солнечной энергии. Рассматривается задача выбора основных проектных параметров и формирование проектного облика ЛА.

В качестве численного метода предлагается использовать метод последовательного приближения.

Так как плотность атмосферы и ее основные характеристики являются значимыми факторами, то при проведении проектного анализа следует учитывать, что на больших высотах атмосфера имеет малую плотность, а силы притяжения к земле практически не убывают. Плотность атмосферы Марса приблизительно соответствует земной на высоте около 35 километров, а гравитационные характеристики планеты примерно в 2 раза слабее земных значений.

Как известно уменьшение плотность атмосферы уменьшает и подъемную силу несущей части летательного аппарата [5]. Выходами из такой ситуации могут быть увеличение скорости обтекания несущей части, но при этом существуют предельные характеристики, когда может случиться раскручивание винта, или увеличить площадь крыла и диаметр винта или количество двигателей. Именно на втором решении в настоящее время сосредоточились производители летательных аппаратов, использующих энергию Солнца для совершения полета. Данное решение целесообразно ввиду того что позволяет увеличить подъемную массу, а вместе с ней количество солнечных преобразователей, от которых зависит энерговооруженность летательного аппарата.

Использование летательных аппаратов с преобразователями солнечной энергии уже в 2004 году стало рассматриваться как возможная технология для изучения других планет. Доказательством этому может служить проект Sky- Sailor [6]. Он был спроектирован как автономный летательный аппарат для исследования Марса.

При выполнении расчетов учитываются ограничения по массе аппарата, задаваемые средствами выведения, а так же интенсивность солнечного излучения и коэффициенты полезного действия преобразователей энергии. Актуальным принципом для выбора параметров аппарата является выбор массо- габаритных параметров в зависимости от подъемной силы и энерговооруженности аппарата.

Литература

1. Mark Zuckerberg - «The technologies behind Aquila», «Facebook», 2016 г.
2. Andrew Cox, Martin Luis Gomez - «Flying Aquila: Early lessons from the first full-scale test flight and the path ahead», «code fabook», 2016 г.
3. Philippe Rathle, Dr. Bertrand Piccard, André Borschberg - «Solar Impulse Foundation», 2016 г.
4. Yvonne Gibbs - «NASA Armstrong Fact Sheet: Helios Prototype» - 2017 г.
5. Григорьев Н.Г. - «Основы аэродинамики и динамики полета», г. Москва, 1995 г.
6. Noth André - «Autonomus solar airplane for Mars exploration»
7. B.Berland - «Photovoltaic Technologies Beyond the Horizon: Optical Rectenna Solar Cell»
8. Ефимов - «Основы авиации», МГТУ ГА, 2003 г.

## Методы контроля авиационных изделий с помощью спекл-интерферометрии

Лат Тун Мин, Ньян Мин Хтет, Вей Хлэйн У
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Волков И.В.
МФТИ, Жуковский
tunminlatt52@gmail.com

Проблема создания средств неразрушающего контроля и анализа технического состояния авиационно-космической техники является актуальной задачей.

В настоящее время существуют различные методики и средства оперативного контроля и анализа технического состояния элементов конструкций.

Однако, создание новых средств неразрушающего контроля, основанных на применении оптических, особенно спекл-голографических методов интерферометрии и расшифровки спекл-голограмм, имеет большую перспективу.

Мы предлагаем создание мобильной оперативной малогабаритной спекл-голографической установки для оперативного обнаружения повреждений конструкции, интерферометрического анализа состояния ее для решения вопроса дальнейшей эксплуатации.

Излагается применение голографических и спекл-интерферометрических методов в экспериментальной механике, в частности при исследовании напряженно-деформированного состояния, особенно в зонах концентрации напряжений в процессе поэлементных, агрегатных или натурных испытаний авиационных конструкций.

Мы предлагаем создание мобильной оперативной малогабаритной спекл-голографической установки для оперативного обнаружения повреждений конструкции, интерферометрического анализа состояния ее для решения вопроса дальнейшей эксплуатации.

Голографическая интерферометрия позволяет проводить анализ сравниваемых состояний объекта в процессе всевозможных воздействий на него: нагружения силового, температурного, вибрационного и т.п. Информация о реакции объекта получается из анализа и интерпретации интерференционных картин полос. Обследовать весь объект единовременно удается не всегда, особенно большеразмерные конструкции. Однако по анализу интерферограмм отдельных мест, наиболее напряженных или требующих определения НДС в отдельных зонах объекта, например в зонах концентрации напряжений, в зонах образований трещин, можно судить о работоспособности, надежности, безопасности, ресурсе всего объекта. Следует заметить, что прежде чем делать заключение об объекте в целом по реакции отдельных мест его, тем более по отдельным этапам напряжения, необходимо произвести расчет конструкции и путем коррекции расчета по экспериментальным данным можно производить экспериментально- расчетный анализ (ЭРА) работы конструкции в целом

Список литературы

1. Волков И.В. Спекл-голография в экспериментальной механике. Изд-во Пензенской гос. технологической академии.-2010.- 199с.

2. Волков И.В. Внестендовая спекл-голография. Использование голографической и спекл-интерферометрии при измерении деформаций натурных конструкций. [Текст] / Компьютерная Оптика.-2010, т. 34.-№1 с.82-89.

## Свойств композиционных материалов, применяемых в конструкциях нагреваемых элементов летательных аппаратов

Мое Хеин Зин, Фон Мьинт Тун
Научный руководитель — профессор, к.т.н. Киреев В.А.
МФТИ, Долгопрудный; Янгон, Мьянма (Бирма)
heinzinmoe.mipt@gmail.com

1. Введение

Термин композиционных материалов был впервые использован в 1950-х годах. Композитный материал представляет собой сложную многокомпонентную многофазную систему, описание работы которой существенно сложнее, чем для традиционных металлов и сплавов.

Композиционный материал имеет силовую структуру из материала, очень хорошо работающую на определенный вид нагрузки, например, растяжение, который имеет долю от 10 и более процентов и заполнитель с существенно более низким удельным весом. Проблема их связи заключается в том, что они имеют допускаемые уровни относительных деформаций, отличающихся в несколько раз. Так, для металла $\varepsilon$ = 10-12 %, а для матрицы – 3-4%. Металлы, используемые в авиационной промышленности, включают сталь,

алюминий, титан и их сплавы. Алюминиевые сплавы характеризуются меньшими значениями плотности по сравнению со стальными сплавами (около одной трети) и хорошими свойствами коррозионной стойкости. Однако стальные сплавы имеют большую удельную прочность на растяжение, а также более высокий модуль упругости. В результате сталь используется в частях летательных аппаратов, для которых важна прочность при малом объеме. Алюминиевая деталь, при равной со стальной весе, будет иметь втрое больший обьем, что позволит, например, сформировать стрингеры панели, повышающие уровень напряжений потери устойчивости. Титан по характеристикам занимает промежуточное место между сталью и алюминием, и его применение оптимально, например, при проектировании шасси и является коррозионно-стойким. Сплав никеля с титаном обладает уникальными свойствами памяти формы и изменения характеристик при изменении температуры, в том числе модуля упругости в 2-3 раза, что позволяет использовать его в элементах, целенаправленно изменяющих форму конструкции. В авиационно-космической и других отраслях промышленности нашли широкое применение конструкции из КМ, получаемые намоткой, сетчатые конструкции, а в последние годы и био-подобные структуры силовых элементов.

2. Разработка методов определения характеристик упругости композитов на изгиб

Использование композиционных материалов (КМ) в конструкциях ЛА требует как современной технологии, так и надежных и универсальных методов расчета, проектирования и экспериментального исследования свойств материала конструкций. КМ часто создаются одновременно с конструкцией, и строго под требуемые характеристики. Поэтому актуальной чвляется разработка экспериментальных основ механики конструкций из КМ, поскольку традиционные методы определения характеристик упругости при нормальной (20°С), повышенной (до 180°С) и пониженной (-60°С) температурах, обладают рядом недостатков, связанных с излишне большим числом характеристик, подлежащих исследованию.

Рассматриваются вопросы, связанные с разработкой методики одновременного определения модулей изгиба и сдвига при испытании образцов определенного материала на изгиб на одной установке.

Используется установка Instron-e10000, которая позволяет один образец испытывать по схеме трехточечного изгиба, а другой - по схеме четырехточечного. Образцы представлены в виде прямолинейных стержней, с постоянной по длине жесткостью. Производят измерения прогибов f1 и f2. Модули упругости и сдвига определяем по формулам, предложенным в Инженерном отделе Кембриджского университета (Structures Data Book), как функция от отклонения w0 в центре балки. Используются также классические соотношения, представленные в работах [1-6].

Литература

1. Васильев В.Б., Протасов В.Д., Болотин В.В. и др. Композиционные материалы. Справочник. М., «Машиностроение», 1990.

2. Грушевский Я.Л. Способ определения модуля сдвига материала при испытаниях на изгиб. Авторское свидетельство №1504554.

3. Киреев В.А., Наумов С. М. Способ определения модулей упругости и сдвига анизотропных материалов при испытаниях на изгиб// Труды ЦАГИ. 2002. Вып.2651.

4. Прочность, устойчивость, колебания. Справочник в трех томах. Том 1. Под ред. д. т. н., проф. Биргера И.А. и чл.□кор. АН Латвийской ССР Поновко Я.Г. М., «Машиностроение, 1968.

5. Тарнопольский Ю.М., Кинцис Т.Я. Методы статических испытаний армированных пластиков. М., «Химия», 1981.

6. Феодосьев.В.И, Спротивление материалов, издательство МГГУ им.н.э. Баумана, 1999.

# Разработка матрицы проектных решений по облику гиперзвуковой крылатой ракеты и их предварительный анализ

Носов Г.А.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Гусейнов А.Б.
МАИ, Москва
Gena00X@ya.ru

Разработка матрицы проектных решений по облику гиперзвуковой крылатой ракеты (ГЗКР) и их предварительный анализ.

Под обликом ГЗКР подразумевается совокупность качественных признаков, технических решений по ним, и их проектных параметров, характеризующих ракету.

К признакам которые определяют качественные особенности облика ЛА можно отнести следующие:

- По внешней конфигурации: Число ступеней и схема их расположения, аэродинамическая схема, геометрические формы элементов планера (фюзеляж, крыло…), неоднородности и качество выполнения внешней поверхности.
- По двигательной установке (ДУ): тип маршевого двигателя, воздухозаборника (ВЗ), сопла (СП), схемы их размещения, вид топлива и т.п.
- По конструктивным решениям: тип конструкционного материала, наличие и тип системы охлаждения, теплозащитных покрытий (ТЗП), других специальных покрытий (например радиопоглощающих), силовые схемы и технологические способы исполнения элементов конструкций и т.п.
- По полезной нагрузке: тип и структура полезной нагрузки, её назначение (боевая часть (БЧ), разведывательное оборудование и т.п.)
- По средствам радиоэлектронного противодействия (РЭП): наличие и тип средств РЭП (станции активных помех (САП), ложные цели (ЛЦ) и т.п.
- По баллистическим характеристикам: параметры траектории и противозенитного маневра, профили скоростей и другое.

Каждый признак определяется множеством конструктивно-компоновочных решений, а техническое решение в свою очередь – вектором геометрических, баллистических, конструктивных и компоновочных параметров. Совокупность признаков, технических решений по ним, и проектных параметров по каждому техническому решению можно представить в виде матрицы проектных решений.

В случае ГЗКР на выбор конструктивных решений оказывают существенное влияние условия полета: такие как резкий рост интенсивности ударных волн, аэродинамический нагрев, высокие перегрузки при маневрировании. При этом многие стандартные решения оказываются неприменимыми, и возникает ряд новых, специфичных для ГЗКР конструктивных решений. Становится необходимым использование жаростойких конструкционных материалов или ТЗП значительной толщины или активных систем охлаждения как по отдельности, так и в различных комбинациях. Возникает задача выбора оптимальных аэродинамических форм с учетом различных и порой противоречивых требований, таких как обеспечение устойчивой работы двигателя, снижение заметности, снижение аэродинамического сопротивления, снижение аэродинамического нагрева, повышение подъемной силы. Возникает задача учета влияния излучения, вызванного аэродинамическим нагревом, на заметность ГЗКР.

В данной работе проведен анализ условий полета ГЗКР и выделены основные факторы, влияющие на выбор конструктивных решений по ГЗКР. Проведен анализ существующих в настоящее время и перспективных конструктивных решений по ГЗКР различных типов и составлена матрица проектных решений по качественным признакам облика ГЗКР.

Библиографические ссылки:

1. Методика структурно-параметрического синтеза конструктивн-компоновочного облика беспилотного летательного аппарата. Гусейнов А. Б., Москва, МАИ, 2011 г., 15 с.

## Устойчивость композитного обтекателя при неосесимметричном внешнем давлении

Остапенко Ю.В., Ахметов С.Н.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Туркин И.К.
МАИ, Москва
yulya-ostapenko@bk.ru

Тонкостенный стеклопластиковый передний обтекатель нагружен внешним давлением, переменным по длине и по окружности. Нагружение соответствует движению с углом атаки. В обтекателе действуют осевые усилия и изгибающий момент. При этом растянутая зона обтекателя нагружена максимальным внешним давлением.

Соотношение меридиональных и тангенциальных (окружных) напряжений переменно по образующей и по окружности, поэтому обеспечить оптимальный угол укладки материала в каждой точке поверхности не представляется возможным. Угол укладки принят одинаковым по всей поверхности. Варианты углов ориентации: 90˚, 0˚, 90˚/0˚, 90˚/90˚, ±30˚, ±60˚, ±54,41˚.

Рассмотрены два случая: обтекатель из стеклотекстолита СК-9-70с и намотанный стеклонитью, связующее – кремний органическая смола.

Значение критического давления рассчитано в зависимости от КМ и угла укладки с помощью метода конечных элементов.

Во всех случаях потеря устойчивости происходила в растянутой зоне, где максимальное внешнее давление и, соответственно, максимальные сжимающие окружные напряжения. Установлено возникновение продольных волн.

Вывод:

- Потеря устойчивости достигается в растянутой зоне, где максимальное внешнее давление, сжатие не сопровождается образованием волн;
- Преимущественное значение жёсткости в окружном направлении;
- При укладке ткани: Pmax достигается при φ=90˚ (все слои – основа по окружности);
- При намотке нити картина принципиально не изменится. Максимальное Ризг достигается при угле укладки φ=90˚/90˚. При укладке φ=0˚/90˚ по 50% в каждом направлении, Ркр близко к Pmax.

1. Авиационные материалы: Справочник в 12-ти томах. – 7-е изд., перераб. и доп./ Под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2010. 210 с.

2. Конструкционные стеклопластики. М.: Химия, 1979. 360 с., ил. Авторы: Альперин В. И., Корольков Н. В., Мотавкин А.В., Рогинский С. Л., Телешов В. А.

3. Справочник по композиционным материалам: В 2-х кн. Кн. 2/Под ред. Дж. Любина; Пер. с англ. А. Б. Геллера и др.; Под ред. Б. Э. Геллера. М.: Машиностроение, 1988. 584 с.

## Исследование устойчивости сетчатого композитного кессона

Павлов Е.А.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Азиков Н.С.
МАИ, Москва
eugenepavoed@gmail.com

В современной авиационной и аэрокосмической отрасли все более возрастает необходимость обеспечения высокой прочности и жестокости при достаточно низкой массе конструкции. Одним из вариантов решения данной проблемы является использование анизогридных (сетчатых) конструкций из композиционных материалов. Такие конструкции представляют собой системы однонаправленных композитных ребер. Обладая невысокой

удельной массой, сетчатые конструкции обладают высокой жесткостью на растяжение и изгиб, и уже используются при проектировании оболочек в ракетно-космической отрасли.

Автором рассматривается анализ устойчивости анизогридного композитного кессона. Кессон представляет из себя коробчатую конструкцию постоянного прямоугольного сечения, стенки, которого представляют из себя прямоугольные композитные пластины, подкрепленные набором спиральных и продольных ребер. Материал монослоя обшивки: ВКУ-25. В данном случае после расчета эквивалентной жесткости подкрепляющей системы ребер, кессон рассчитывается с помощью метода конечных элементов. В качестве элемента выступает треугольник с шестью степенями свободы в каждом узле. Данный элемент позволяет рассчитать мембранные и изгибные деформации и напряжения.

В связи с тем, что исследование предполагает построение множества моделей, что является крайне трудоемким этапом численного исследования, автором была реализована программа для расчета потери устойчивости сетчатого кессона с помощью метода конечных элементов, в среде MATLAB. В программу заложена возможность визуализации форм потери устойчивости и отображения графиков зависимости коэффициента запаса по устойчивости в зависимости от угла наклона спиральных ребер. Для проверки корректности расчета ряд частных случаев были рассчитаны, используя коммерческом пакет MSC Patran. Различия в расчете коэффициентов безопасности между авторской программой и коммерческим пакетом составляет 1-3%.

В ходе численного эксперимента были построены графики зависимости коэффициента безопасности от угла наклона спиральных ребер для следующих вариантов нагружения: продольное усилия, перерезывающее усилие, изгибающий и крутящий момент.Углы наклона изменяются от 5°-85° с шагом в 5°. Углы 0° и 90° не рассматриваются. Определены оптимальные углы наклона спиральных ребер. Для осевой нагрузки, перерезывающего усилия и изгибающего мемента оптимальный угол составил 55°.

Литература:

1. Лехницкий С.Г. – Теория упругости анизотропного тела. – М. :Изд-во «Наука» 1977 416 с.
2. О. Зенкевич Метод конечных элементов в технике. –М. :Изд-во «МИР» 1975 - 541 с.
3. Н. И. Безухов – Основы теории упругости, пластичности и ползучести. – М. :Изд-во «Всшая Школа» 1961 537 с.

## Проектирование космического аппарата для исследования атмосферы Венеры

Паруткина К.А., Ипатова Е.С.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Тузиков С.А.
МАИ, Москва
parutkina.camila2014@yandex.ru

Венера ближайшая малоизученная к Земле планета Солнечной системы. По своему происхождению она похожа на нашу планету, но по физическим и химическим процессам, происходящим в атмосфере и на ее поверхности, похожа на Землю.

Проектируемый космический аппарат является носителем зондов и исследовательского оборудования, для изучения Венеры.

Долетев до планеты, космический аппарат опуститься в атмосферу и останется на высоте, где условия более похожи на земные.

Находясь на этой высоте, аппарат выпустит зонды, тем самым увеличив площадь исследовательских работ.

Зонды оснащены дополнительным исследовательским оборудованием. Каждый зонд будет выполнять определенные виды работ, в частности исследование атмосферы и поверхности.

Возвращение зондов на носитель не предусматривается, так же как и носителя на Землю. Вся информация, которую они получат в ходе исследовательских работ, будет сначала отправлена на носитель, а после на Землю.

Целью проекта являются наблюдение и исследование планеты.

Задачи:

1. Предложить конструкцию исследовательских зондов и носителя (космический аппарат) для исследования атмосферы и поверхности Венеры.
2. Решить проблему влияния пагубных внешних факторов на конструкцию космического исследовательского аппарата и его зондов.
3. С помощью исследовательских зондов планируется продолжить изучение планеты. В частности, ее климат, спиралевидных вихрей, пятен на Венере, странного светящегося тумана.
4. Попытаться найти ответ на вопрос: «Почему оксид серы и вода поднимаются на большую высоту?».

## Оценка возможностей по унификации элементов гидроприводов (насосов) в авиационной и ракетно-космической технике

Полин А.В.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Гончар А.Г.
МАИ, Москва
andrey.polin.1995@mail.ru

Целью унификации является снижение числа проектируемых изделий, а также сокращение сроков изготовления нового оборудования. Благодаря унификации, можно удешевить производство изделий.

При создании машин и оборудования унификация позволяет решить следующие задачи:

- выпуск новой продукции и обеспечение высоких темпов проектирования;
- развитие специализации производства, которое значительно сможет повысить качество выпускаемой техники за счет внедрения новых технологий.

Для определения возможных вариантов по унификации элементов гидроприводов (насосов) в авиационной и ракетно-космической технике необходимо исследование характеристик выбранных гидроприводов.

Были выбраны два гидропривода из авиационной техники и два гидропривода из ракетно-космической техники. Были составлены таблицы с параметрами гидроприводов. Были проведены сравнения этих агрегатов по показателям: входного давления, выходного давления, расходу топлива, расходу масла, рабочей температуры, утечек, массы агрегатов, их оборотов, допустимым вибронагрузкам. После тщательного сравнения параметров агрегатов была дана оценка возможностей унификации элементов гидроприводов в авиационной и ракетно-космической технике.

Таким образом, проведённый анализ показал невозможность проведения унификации рассмотренных в научной исследовательской работе магистра элементов гидроприводов (насосов) и их использования в существующих образцах авиационной и ракетно-космической технике.

Но этот вывод, как было отмечено и ранее, не снимает с повестки дня актуальность решения задачи по унификации элементов, используемых в авиационной и ракетно-космической технике.

# Методика расчёта настраиваемого резонатора

Радин Д.В., Аленин С.В.
Научный руководитель — доцент, д.т.н. Макарьянц Г.М.
СНИУ им. С.П. Королёва, Самара
radin.danila.v@gmail.com

В настоящее время в гидравлических системах в качестве основного источника расхода наиболее часто используются шестерённые насосы. Несмотря на свои достоинства шестерённые насосы характеризуются высокой виброакустическая нагруженность элементов как самого шестерённого насоса, так и других элементов гидравлической системы, что существенно влияет на ресурс и надёжность системы в целом.

Наиболее целесообразным методом устранения колебаний рабочей жидкости в данном случае является применение гасителя типа ответвлённого резонатора. Но его эффективность будет максимальной только тогда, когда его резонансная частота будет изменяться в зависимости от режима работы насоса. Наиболее технологичным и реализуемым способом изменения резонансной частоты гасителя является изменение объема его полости.

Для расчёта такого регулируемого гасителя колебаний была создана автоматическая система, которая позволяет:

1. существенно ускорить процесс проектирования регулируемого гасителя колебаний, а значит и снизить его стоимость
2. оценить его эффективность при всех значениях объёма полости во всем частотном диапазоне;
3. проектировать нерегулируемые резонаторы и оценивать их эффективность.

Созданная автоматическая система расчёта настраиваемого резонатора выполнена в программе Microsoft Excel и состоит из 3 частей:

1. Проектный расчёт резонатора с объемом, обеспечивающим минимальный необходимый коэффициент вносимого затухания во всем частотном диапазоне;
2. Расчёт эффективности полученного резонатора
3. Расчёт эффективности резонатора при изменении объёма полости

Исходными данными для расчёта являются:

1. Коэффициент вносимого затухания;
2. Ширина диапазона подавляемых частот колебаний;
3. Диаметр трубопровода;
4. Длина стендового трубопровода;
5. Модуль импеданса насоса;
6. Амплитуда первой гармоники;
7. Рабочая жидкость и её температура.

В качестве основы для разработки методики проектного расчёта была взята методика проектного расчёта нерегулируемого резонатора, приведённая в работе В.П.Шорина [1]. Она была полностью автоматизирована, а также уточнена, т.к. решение уравнений осуществляется не с помощью номограмм, а с помощью численных методов. В результате выполнения проектного расчёта рассчитываются все геометрические параметры гасителя. Для удобства создаётся его схематичное изображение.

Сравнение результатов, полученных с помощью созданной автоматической системы с результатами расчёта прототипа показало хорошую согласованность, что позволяет сделать вывод об адекватности используемой методики проектного расчёта.

Для расчёта эффективности резонатора была разработана методика. Оценку расчёта эффективности спроектированного гасителя проведём, сравнив результаты, полученные с помощью созданной системы, с экспериментальными данными для прототипа. Расчётные значения эффективности гасителя качественно совпадают с экспериментальными данными,

что позволяет сделать вывод об адекватности используемой методики расчёта эффективности. Различие количественных значений эффективности обусловлено используемой методикой расчёта потерь в горле резонатора.

Далее проводится расчёт эффективности резонатора при изменении объема его полости. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что созданная система позволяет оценивать изменение резонансной частоты и эффективности гасителя при изменении объёма его полости.

Результатом проведенной работы является полностью автоматическая система расчёта настраиваемого резонатора, которая позволяет значительно сократить время, а значит и стоимость проектирования данного агрегата.

Список использованных источников:

1. Шорин В.П. Устранение колебаний в авиационных трубопроводах. М.: Машиностроение, 1980. 156 с.

## Анализ гибких надувных оболочек пилотируемых космических аппаратов

Рамазанова Д.Р.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Алифанов О.М.
МАИ, Москва
ramazanova-djamilya@mail.ru

Сейчас развитие космонавтики стоит на этапе перехода к пилотируемым полетам к другим планетам солнечной системы. Этот этап выдвигает качественно новые требования к пилотируемым космическим аппаратам (КА). Такие аппараты должны быть гораздо более крупными и многофункциональными, по сравнению с современными пилотируемыми аппаратами, и поэтому для них вопрос минимизации массогабаритов является наиболее приоритетным. Отсюда возникает необходимость поиска других технических и технологических решений для таких КА. Одним из таких путей является замена внешней оболочки аппарата на облегченную гибкую оболочку. Осознание этого факта привело к актив разработкам таких конструкций, проводимых параллельно в разных странах.

Такой тип оболочки отличается от жесткой металлической содержанием различных слоев из гибких (пленочных и тканевых) материалов, каждый из которых выполняет свои функции. Разделены функции защиты от теплового воздействия, защиты от микрометеоритов, а также функция развертывания конструкции в космосе до необходимой формы.

В данной работе осуществлен обзор существующих решений надувных гибких оболочек. А именно, рассмотрены конструкторские решения и характеристики американской оболочки КА "BEAM", оболочки, разрабатываемой в РКК «Энергия», а также вариант оболочки, предлагаемой мной.

В предложенной мной мягкой гибкой надувной оболочке отличительной чертой является формообразующий слой, придающий необходимую форму надувного модуля за счет наддува специального слоя.

Произведено сравнение характеристик трех типов оболочек с определением преимуществ и недостатков каждого.

## Статистический синтез проектной задачи с функциональными ограничениями

Рубан В.Д., Горупай Е.В.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Балык В.М.
МАИ, Москва
eleod-ryt@mail.ru

Рассматривается задача выбора оптимальных проектных параметров беспилотного летательного аппарата с функциональными ограничениями на вероятность обнаружения цели и на запас топлива.

Предполагается, что на аппарат действуют неконтролируемые факторы, связанные с целью.

Для решения задачи методом статистического синтеза необходимо составить статистическую выборку. Так как данная задача решается в условиях многофакторной неопределенности, обусловленной действиями неконтролируемых факторов, то для каждого варианта проектного решения задаются S вариантов возможных значений неконтролируемых факторов, которые задаются в области определяемой требованиями технического задания. Суть работы с функциональными ограничениями состоит в том, что в тех строчках, где функциональное ограничение не выполняется, эти строчки удаляются и по оставшейся выборке формируются новые статистические полиномы. Утверждается, что новые полиномы удовлетворяют заданным функциональным ограничениям, на основании того, что все свойства, имеющиеся в статистической выборке, сохраняются в полиномах, восстановленных по этим выборкам.

The problem of choosing the optimal design parameters of an unmanned aerial vehicle with functional limitations on the probability of target detection and the fuel supply is considered.

It is assumed that the apparatus is subject to uncontrolled factors related to the purpose.

To solve the problem by the method of statistical synthesis, it is necessary to compile a statistical sample. Since this task is solved under conditions of multifactor uncertainty caused by uncontrolled factors, for each variant of the design solution, S variants of possible values of uncontrolled factors are given, which are specified in the area defined by the requirements of the technical task. The essence of working with functional limitations is that in those lines where the functional restriction is not fulfilled, these lines are deleted and new statistical polynomials are formed for the remaining sample. It is argued that the new polynomials satisfy the given functional constraints, on the basis that all the properties available in the statistical sample are stored in the polynomials reconstructed from these samples.

## Оптимизация раскрытия солнечной батареи рулонного типа

Симонов А.М., Мамиев В.С., Степанов Е.В.
МАИ, Москва
sadusattack@yandex.ru

В данном исследовании рассматривается актуальная проблема в использовании солнечных батарей рулонного типа, а также, почему имеется перспектива в использовании такого вида солнечных батарей на космических аппаратах.

Для введения в курс исследования будет осуществлено обоснование использования определенного вида фотоэлектрического преобразователя по материалу на солнечных батареях рулонного типа.

Выбор оптимальной формы сечения каркаса для раскрытия солнечной батареи данного типа и физическое обоснование его использования (увеличение прочности каркаса) будет являться основным тезисом в последующем использовании таких солнечных батарей.

Необходимость обеспечения достаточной жесткости для пространственно протяженных элементов космических аппаратов в связи с большими линейными размерами, необходимость недопущения резонансных явлений для пространственно протяженных элементов космических аппаратов, а также обеспечение особенных режимов работы силовых элементов конструкции: в транспортном положении, в рабочем положении, а также в процессе непосредственного развертывания пространственно протяженной конструкции в условиях орбитального полета с учетом дополнительно возникающих динамических нагрузок.

Предложение по развёртке и сворачиванию солнечных батарей рулонного типа является дополнительным анализом к прогрессивному решению задачи оптимизации и дальнейшем использовании таких батарей.

Из доклада будут приложены графики, расчёты, иллюстрации, процентные соотношения и прочие сводки для обоснования и подведения итогов проделанной работы.

## Анализ статистических критериев при прогнозировании развития технической системы

Строкова Е.Ю.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Балык В.М.
МАИ, Москва
gstrokova75@mail.ru

Анализ статистических критериев является одной из важных тем в техническом прогнозировании. Рассматривая более подробно данную тему, становится ясно, что основной задачей при техническом прогнозировании является задача построения оптимального прогнозирующего полинома.

В данной работе в качестве прогнозирующего модели принимается тригонометрический полином. Коэффициенты Фурье полинома, частота определяются по одному из статистических критериев, и одна из основных проблем в прогнозировании состоит в выборе конкретного вида этого критерия.

В качестве таких критериев рассматривались статистические критерии: Дарбина-Уотсона, критерий детерминации, критерий регулярности. Оптимальные коэффициенты ряда Фурье находятся из условия минимизации критерия регулярности, который состоит из критерия оптимальности, математической модели, проектного решения и области допустимых значений.

В работе рассматривалась задача прогнозирования стоимости беспилотного летательного аппарата (БЛА) от времени. Такая зависимость была представлена в виде статистической таблицы, состоящая из семидесяти двух строчек (72), по которым осуществлялся ретро-прогноз, то есть некоторое количество строчек считалось неизвестным. По заданию часть обучения - это значения цены с 11 по 60 дату. Необходимо провести прогноз и ретро-прогноз по результатам моделирования на участке обучения. По результатам исследования были получены зависимости стоимости беспилотного летательного аппарата (БЛА) для различных временных интервалов в виде тригонометрических полиномов.

# Методика формирования требований к облику БЛА

Третьяков Н.К., Семавина Н.А.
Научный руководитель — Калягин М.Ю.
МАИ, Москва
DartMolodec@mail.ru

Цель работы состоит в следующем: на основе имитационного моделирования стандартной ситуации сформировать требования к модернизируемому БЛА. Требованиями к облику являются: скорость полета БЛА, масса полезной нагрузки, компоновочная схема, условия подхода, точность системы наведения. Требования формируются под заранее заданную эффективность применения.

Расчет эффективности ведется на базе логико-вероятностного подхода. Решение проблемы состоит из трех этапов:

1) Создание физических моделей процессов, нужных для реализации выполнения целевой задачи БЛА

2) Составление математических моделей на основе физических. Математической моделью является функция алгебры логики (ФАЛ), состоящая из возможных сочетаний событий, приводящих к выполнению функции БЛА, т.е. прекращение выполнения целевым объектом своих функциональных характеристик.

3) По составленной на втором этапе ФАЛ выводится вероятностный полином. Он состоит из событий, полученных благодаря моделям при выполнении первого этапа.

Принципы построения графа события «потеря функциональных характеристик объекта» можно представить таким образом:

- Объект представляется в виде совокупности уязвимых областей,
- Каждый «лист» графа соответствует какому - либо событию,
- Между событиями установлены логические связи.

За этапом разработки моделей следует имитационное моделирование для различных вариантов параметров облика БЛА. Моделирование осуществляется путем последовательных приближений с использованием метода Монте-Карло.

Для выполнения имитационного моделирования мы прибегли к использованию следующих физических моделей, описывающих взаимодействие всего БЛА и отдельных частей с объектом воздействия:

- Модель оценки скорости БЛА,
- Модель оценки выполнения функции БЛА при недолете,
- Модель оценки выполнения функции БЛА при выполнении поставленной задачи.

На основании описанного выше подхода и алгоритмов для различных параметров облика модернизированного БЛА осуществляется анализ эффективности. Полученные результаты позволяют построить поверхность потери функциональных характеристик объекта

Нетрудно показать, что вид поверхности и размер цветовых областей зависит от параметров облика БЛА. Т.О. варьируя различными параметрами, через изменение поверхности, можно проследить влияние параметров друг на друга. Предложенный метод позволяет сформировать требования к модернизированным БЛА.

Список литературы

Н.И. Самойленко, А.И.Кузнецов, А.Б.Костенко – Теория Вероятностей. Харьков 2009.

Гусейнов А.Б. - Особенности проектирования крылатых ЛА с ВРД. МАИ 1987

Дракин И.И. - Основы проектирования беспилотных летательных аппаратов с учетом экономической эффективности. Машиностроение, 1973

# К созданию актуаторов для адаптации летательного аппарата к режиму полета

Тун Фон Мьинт, Хейе Зин Мое, Ньян Мин Хтет
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Семенов В.Н.
МФТИ, Долгопрудный; Янгон, Мьянма (Бирма)
phonemyinttun52@gmail.com

Конвертоплан с поворотными двигателями может сочетать вертикальный взлет и посадку с практически вдвое увеличенной по сравнению с вертолетом скоростью и дальностью полета. Это очень важно, например, для Арктических районов России, поскольку позволяет перекрыть воздушными линиями острова со стационарными аэроплощадками в Северном ледовитом океане (СЛО). Многорежимность летательных аппаратов (ЛА) делает целесообразной преобразование их конфигурации и элементов в полете для достижения оптимальных характеристик в каждом из режимов. Одним из наиболее распространенных видов актуаторов, меняющих взаимное расположение или ориентацию подконструкций, являются элементы из сплавов с памятью формы (СПФ), работающие на кручение. Использование СПФ в таком проекте целесообразно ввиду выгоды в простоте устройств, их компактности и многофункциональности.

Исследование топологически многозамкнутых конструкций таких, как замкнутые системы крыльев ЛА требует расширения возможностей методов исследований. Универсальные расчетные методы, такие, как метод конечных элементов (МКЭ), дают достаточно подробную картину напряженно-деформированного состояния (НДС) любой конструкции. Однако, расчетчик может ошибиться в выборе расчетной схемы и трактовке полученных результатов, особенно в зонах стыков подконструкций сложной конфигурации. И здесь важнейшую роль приобретает наличие результатов эксперимента.

В лаборатории прочности ФАЛТ МФТИ, наряду с использованием традиционных стендов, осваиваются возможности испытательной машины Instron-10000 с фирменными и авторскими приспособлениями, позволяющими исследовать характеристики актуаторов, основанных на свойствах СПФ, в частности, никелида титана (NiTi).

Важнейшим новым инструментарием является СПЕКЛ-голография, обеспечивающая уточненное исследование НДС по местной прочности. Фотопластинки ПФГ 03М, наложенные на конструктивные детали, после голографического экспонирования в исходном и нагруженном состоянии проявляются и поступают на установку расшифровки спекл-голограмм с коллиматором и линзой производящей Фурье преобразование. При освещении монохромным светом спекл-голограмм наблюдается дифракционная картина, в которой направление и частота полос позволяют рассчитать напряжения, деформации, а при надлежащем опыте и представить всю картину локального НДС.

В лаборатории проводятся работы по демонстрации возможностей актуаторов из СПФ для преобразования и управления деформациями конструкций. Исследуется модель привода цельноповоротного вертикального оперения ЛА на основе СПФ. Нагрев актуатора производится электрической спиралью. Формируется стенд для исследования способов управления углом атаки замкнутого крыла с использованием актуатора из СПФ. Здесь на замкнутое крыло ЛА воздействует S-образный элемент из СПФ.

Нагрев актуатора из СПФ приводит к увеличению угла атаки консолей в их средней части. Таким образом, появляется возможность изменять интегральный угол атаки замкнутого крыла ЛА, не изменяя угол атаки фюзеляжа. При снятии нагрева с актуатора упругость консолей замкнутого крыла приводит их в исходное положение.

Литература

1. Semenov V.N. A comparison of the weight ration of the airframe designs of aircraft with a cantilever wing and with a closed wing system. // NASA TM-77842. 1985.

2. Вяхxи И.Э., Семенов В.Н. К использованию сплавов с памятью формы в качестве приводов и активных элементов адаптивных конструкций летательных аппаратов. // Труды ЦАГИ. 2005. Вып. 1996. С. 208-214.
3. Гюнтер В.Э. и др. Медицинские материалы и имплантанты с памятью формы. Томск, 1998.
4. Мовчан А.А., Ньюнт Со., Семенов В.Н. Проектирование силовозбудителя крутящего момента из сплава с памятью формы. // Труды ЦАГИ. 2004. Вып. 2664. С. 220-230.
5. Семенов В.Н. Адаптация замкнутого крыла самолета к режиму полета с использованием интеллектуальных устройств. // Механика композиционных материалов и конструкций. Т.1.10, № 3, 2004. С. 326-340.
6. Семенов В.Н. Конструкции самолетов замкнутой и изменяемой схем. - М.: ЦАГИ, 2006. 228 с.
7. Волков И.В. СПЕКЛ – голография в экспериментальной механике. Пенза.: ПГТА. 2010. 198 с.
8. Войтышен В.С., Коллеров М.Ю., Семенов В.Н., Щербаков В.Н., Фон М.Т. Тенденции использования сплавов с памятью формы в технике и медицине. // Механика композиционных материалов и конструкций. М.: ИПРИМ РАН. Т.23. № 2. 2017. С. 157-167.
Научный руководитель Семенов В.Н. – д.т.н., г.н.с. ЦАГИ, проф. каф. МФТИ

## Исследование НДС на образцах с отверстиями по пространственным компонентам тензора деформаций

Хтет Ньян Мин, Тун Мин Лат, Вей Хлэйн У
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Волков И.В.
МФТИ, Жуковский
nyanminhtet6@gmail.com

В настоящее время пространственные компоненты тензора деформаций могут быть определены и измерены методами голографической интерферометрии.

Для исследования напряженно деформированного состояния (НДС), изделие подвергается эксплуатационным видам нагружения по этапам, определяемым диапазоном регистрируемых деформаций. Для голографической интерферометрии этот диапазон по деформациям составляет, или по перемещениям u=1-100мкм, что соответствует дифференциальным приращениям нагрузок и деформаций.. Этот диапазон определяется по корреляции оптических полей, дающих картину полос - интерферограмму. Концентрация напряжений, как правило, по закону Гука соответствует концентрации деформаций. А концентрация деформаций определяется по отношению шага полос в зоне номинальных напряжений (на удалении от концентратора) к минимальному шагу полос в зоне концентрации напряжений и соответственно деформаций. Причем для определения шага полос можно использовать черную и белую полосу, вернее их середины, которые определяются либо визуально, в ручную, либо автоматически по программе сканирования картин полос. Так наглядно, просто и эффективно может быть определен коэффициент концентрации напряжений, используемый в дальнейших расчетах на прочность конструкций.

Нами были исследованы различные образцы с отверстиями на испытательной машине Instron 10000E.

Проблема создания средств неразрушающего контроля и анализа технического состояния авиационно-космической техники является актуальной задачей.

В настоящее время существуют различные методики и средства оперативного контроля и анализа технического состояния элементов конструкций.

Однако, создание новых средств неразрушающего контроля, основанных на применении оптических, особенно спекл-голографических методов интерферометрии и расшифровки спекл-голограмм, имеет большую перспективу.

Список литературы

1.Волков И.В. Спекл-голография в экспериментальной механике.

Изд-во Пензенской гос. технологической академии.-2010.- 199с.

2.Волков И.В. Внестендовая спекл-голография. Использование голографической и спекл-интерферометрии при измерении деформаций натурных конструкций. [Текст] / Компьютерная Оптика.-2010, т. 34.-№1 с.82-89.

# Секция №5.3 Проектирование и отработка теплонагруженных конструкций

## Исследование возможностей прямоточных воздушно-реактивных двигателей на нижних ступенях ракет носителей

Бродский М.Ю., Прудников Ф.Е., Алпатов Р.С.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Никитин П.В.
МАИ, Москва
Hellflare@yandex.ru

История развития ракетно-космической техники (РКТ) связана с борьбой за повышение удельного импульса двигательных установок. Снижение секундного расхода рабочего тела при обеспечении необходимых показателей тяги, позволяет уменьшить массу необходимых запасов топлива и за счёт этого увеличить массу полезной нагрузки. Одним из возможных способом повышения удельного импульса является снижение молекулярной массы продуктов сгорания топливной пары или повышение температуры или давления в камере двигателя. Использование таких подходов имеет ряд ограничений, связанных с жаропрочностью и жаростойкостью конструкционных материалов.

Существуют примеры высокоскоростных объектов РКТ для которых использование воздушной среды позволяет добиться существенного повышения характеристики. Существующие прямоточные воздушно реактивные двигатели (ПВРД) способны устойчиво работать на скоростях до 15 М и высотах до 50 км. Тяга их при этом достигает 10-15т. Эти значения могут показаться недостаточными для РН, но удельный импульс ПВРД достигает 800-1450м/с. Проведённые расчёты показали теоретическую возможность достижения относительной массой полезной нагрузки 10% стартовой массы.

Для обеспечения эффективной работы ПВРД и аэродинамических органов управления требуется траектория выведения с продолжительным атмосферным участком, следствием чего является (при значительном, по некоторым оценкам до 2,5, аэродинамическом качестве аппарата) снизить начальную тяговооружённость. Наличие аэродинамических поверхностей так же привлекательно возможностью достижения многоразовости системы без резервирования части топлива на обеспечение выхода в заданный район и посадки (возможно чисто баллистическое решение задачи).

При полёте на гиперзвуковой скорости в плотных слоях атмосферы конструкция ЛА подвергается значительным тепловым нагрузкам, что приводит к росту доли средств теплозащиты в массе системы. Распределение тепловых потоков по поверхности планера определяется характером обтекания, который зависит от облика ЛА. Аэродинамика накладывает ряд ограничений на форму изделия, приводя к необходимости поиска иных методов воздействие на ударную волну, сжатый и пограничный слой. Выполненные расчёты показывают принципиальную возможность изменения характеристик скачка уплотнения при воздействии на него электромагнитными полями высокой интенсивности.

# Измерение плотности потока внутреннего тепла Луны

Дудкин К.К.
Научный руководитель — член-корреспондент, д.т.н. Алифанов О.М.
МАИ, Москва
lord-konst@mail.ru

В данное время большой интерес представляет исследование внутреннего строения Луны.

Для правильного понимания эволюционного пути развития Луны необходимо выяснить существующие в настоящее время внутренние тепловые потоки. Например, среднестатистический температурный поток может быть использован для определения общего содержания на Луне урана. Правильная оценка параметров теплового потока в глобальных масштабах дает возможность резко ограничить количество существующих моделей эволюции термических процессов. Контактные измерения теплового потока на данный момент слишком малочисленны (всего 2 измерения).

Для измерения плотности теплового потока (ПТП) рассматриваются следующие типы датчиков, которые подразделяются на:

- поверхностные
- проникающие.

Проникающий датчик ПТП (подобно использованному в миссиях «Аполлон-15» и «Аполлон-17») имеет ряд недостатков:

1. необходимость бурения скважины
2. выравнивание температуры по длине датчика из-за более высокой теплопроводности относительно грунта
3. Необходимость измерения теплофизических характеристик грунта

Однако, преимущество заключается в высокой надежности получаемых данных и достаточной их точности.

Поверхностные датчики ПТП подразделяются на:

- С термоизолированными поверхностями
- С термоизолированной боковой поверхностью
- Н-образный датчик
- Батарейный датчик с термопарами
- Батарейный датчик на основе монокристаллов висмута

Наиболее перспективным на данный момент из перечисленных схем показал себя батарейный датчик на основе монокристаллов висмута.

Данные датчики имеют ряд преимуществ, по отношению к проникающему датчику, таких как:

1. Отсутствие необходимости бурения скважины
2. Отсутствие необходимости измерения теплофизических характеристик грунта
3. Меньшие размеры конструкции

Однако минусами поверхностных датчиков можно назвать:

1. Меньшую стабильность и точность результатов
2. Меньшее количество получаемых научных данных

Подводя общий итог, можно сказать, что оба типа датчиков имеют потенциал для применения. Весь вопрос в том, насколько обширными будут исследования в миссии, где эти датчики будут применятся. Если миссия в целом обладает большими ресурсами и возможностью использования бура, то лучшим решением будет применение проникающего датчика (а возможно, и обоих датчиков в комплексе). Если же таких ресурсов нет, то компромиссным вариантом будет решение использовать батарейный датчик на основе монокристаллов висмута.

Автор: Дудкин Константин Кириллович, Место учебы: МАИ, аспирант

Адрес: 125130 г. Москва ул. Клары Цеткин д.29/1 кв. 39, Телефон: 89636822286 (моб.), 84956014449 (дом.), e-mail: lord-konst@mail.ru

## Пенетратор для исследования марсианского грунта

Антипова А.М.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Береговой В.Г.
МАИ, Москва
alinaant711@gmail.com

Использование пенетраторов в настоящее время рассматривается все больше и больше в качестве перспективного направления для изучения планет. Несмотря на довольно большой объём проведенных работ по исследованию физико-химических свойств марсианского грунта, количество информации о них все еще остается недостаточной, что требует проведения еще многих исследований. Ценными достоинствами пенетратора, по сравнению с другими буровыми установками, являются простота конструкции и использования, допустимость движения в грунте под любым углом, компактность. Для исследования внутренней структуры Марса предполагается использовать пенетраторы, представляющие собой ударный проникающий зонд, снабженный ракетным двигателем. До летных испытаний доведены пенетраторы станций Марс-96 и Mars Polar Lander. Оба предполагались для исследований Марса. В 2018 году НАСА планирует доставить на Марс аппарат InSight, в составе которого будет бур, по сути являющийся пенетратором.

Целью данной работы является определение параметров и характеристик пенетратора при заданной максимальной глубине проникновения в марсианский грунт. Объектом исследования является пенетратор для исследования марсианского грунта. Задача выбора параметров пенетратора при движении в марсианском грунте может быть сформулирована следующим образом: при заданном значении глубины проникновения и массе полезной нагрузки, равной нулю, определить проектные параметры пенетратора, обеспечивающие его минимальную начальную массу, при проникании в грунт, имеющий заданные физико-механические характеристики, с определенной скоростью.

## Технико-экономический анализ схемных решений целевой аппаратуры перспективного космического аппарата

Арустомян В.А., Петров М.Е.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Ламзин В.А.
МАИ, Москва
v.arustomyan@icloud.com

В связи с бурным развитием малогабаритных космических аппаратов вопросы разработки инновационной аппаратуры для них в настоящее время становятся наиболее актуальными.

Появление нового высокоточного оборудования, модернизация технологических процессов и применение новых алгоритмов работы позволяют усовершенствовать существующие оптические схемы, а также применять ранее неиспользуемые.

В докладе проводится технико-экономический анализ схемных решений целевой аппаратуры и её элементов с целью минимизации массово-габаритных характеристик как целевой аппаратуры, так и космического аппарата в целом.

Рассматривается ряд вариантов схемных решений оптических систем: Кассегрена, Корша, модифицированная двухлинзовым корректором Долла – Кёркэма – Максурова и четырехзеркальная схемы. Реализация этих схем для малых космических аппаратов представляет все еще значительную проблему, но по сравнению с другими имеют больше

достоинств и целесообразны для рассмотрения и анализа. Достоинствами этих схемных решений являются значительный опыт создания и технологичность конструкции, широкий спектральный диапазон, отсутствие внешних бленд, искажений и коматической абберации, а также высокое значение разрешающей способности и малые массово-габаритные характеристики объективов.

Проведен анализ схемных решений, разработаны проектные модели и в результате получены рациональные массово-габаритные характеристики целевой аппаратуры бортовых служебных систем и малогабаритного космического аппарата в целом.

## Анализ истории развития авиационных твёрдотопливных ракетных ускорителей

Архипов С.В.
Научный руководитель — Токарев А.С.
МАИ, Москва
upperStage@yandex.ru

Главная полезная функция авиационных стартовых ракетных ускорителей – это сокращение разбега самолёта при взлёте. Для выполнения данной функции, применяются твёрдотопливные ракетные ускорители (ТТРУ), которые просты по своему устройству, а также в производстве и в использовании.

Необходимость применения стартовых ускорителей вызвана следующими условиями взлёта:

- противник уничтожил некоторую часть взлётно-посадочной полосы (ВПП), необходимо взлететь с оставшегося участка;
- самолёт находится в перегрузочном режиме, необходимо взлететь без увеличения длины разбега;
- ВПП в виде грунта разной плотности;
- аэропорт находится в высокогорье и (или) области с высокой температурой окружающей среды;
- ограничения акватория;
- межсезонье.

Развитие авиационных стартовых ускорителей обратно пропорционально развитию турбореактивных двигателей, поэтому, этап широкого применения стартовых ускорителей в авиации приходится на время, когда турбореактивных двигателей ещё не было или они только начинали развиваться.

В процессе развития тяговооружённость ТТРУ увеличивалась посредством уменьшения массы и увеличения тяговых возможностей ускорителей, уменьшались габариты, увеличивался импульс силы, росла надежность и расширялось производство.

Идеальным конечным результатом развития ТТРУ является система безаэродромного старта (точечный или нулевой старт). Благодаря данной системе, самолёт имеет нулевой (точечный) разбег – мгновенный взлёт. Можно сказать, что ВПП – это точка, а точнее говоря – пусковая установка.

В своей работе я исследовал анализ истории развития авиационных твёрдотоплевных ракетных ускорителей, а именно: проблемы развития и способы их решения, построил график закона развития такого параметра как импульс силы в соответствии с S-кривой, сделал выводы о перспективах применения стартовых ускорителей.

# Малые летательные аппараты с поворотными двигателями и аэродинамическими поверхностями как перспективное направление развития беспилотных систем

Баринов А.В.
Научный руководитель — профессор, к.т.н. Малышев В.В.
МАИ, Москва
alphard.ayer@gmail.com

В настоящее время беспилотные летательные аппараты(БПЛА) приобрели популярность при решении широкого круга задач гражданского и промышленного сектора. БПЛА возможно применять в условиях, когда использование пилотируемой авиации нецелесообразно, затратно или рискованно. Беспилотные летательные аппараты ориентированы на выполнение различных задач:

– мониторинг территорий и объектов в дневное и ночное время;
– доставка грузов;
– ведение поисковых работ;
– геологическая разведка;
– аэросъемка местности;
– использование в качестве носителя ретранслятора радиосигналов и др.

В общем случае БПЛА можно разделить на два типа: БПЛА самолетного типа и вертолетного. БПЛА самолетного типа в настоящее время занимают больший объем в секторе используемых БПЛА, чем вертолетного типа. Это связано с рядом таких преимуществ как энергоэффективность, большая продолжительность полета, низкий шум, высокая продольная скорость. Но они лишены таких преимуществ БПЛА вертолетного типа как возможность вертикального взлета и посадки и зависание над заданной точкой местности. В связи с этим актуальной является задача создания БПЛА способного объединить преимущества представленных классических схем. Такая постановка задачи приводит к широкому классу БПЛА гибридного типа, в общем случае называемых конвертопланами. Конвертоплан – летательный аппарат с аэродинамическими поверхностями и поворотными винтами, которые на взлёте и при посадке работают как подъёмные, а в горизонтальном полёте – как тянущие. Таким образом, этот аппарат ведет себя как вертолет при взлете и посадке, но как самолет в горизонтальном полете. Такая схема летательного аппарата позволяет при сохранении таких важных технических особенностей как вертикальный взлет и посадка, существенно увеличить потенциал оперативности при выполнении ряда таких задач, как доставка медикаментов в труднодоступные регионы, оперативная разведка и в схожих задачах, которые требуют способность вертикального взлета и посадки, а также возможность зависания над заданной точкой местности, сохраняя при этом возможность высокого быстродействия при перелете на удаленные расстояния. Успешное решение проблемы создания автономного конвертоплана приведет к высокой заинтересованности им со стороны различных областей жизнедеятельности, а также, расширит круг технических возможностей при использовании гибридного типа летательных аппаратов.

Современное авиастроение характеризуется широким использованием систем автоматического управления, без которых невозможно эффективное применение беспилотных ЛА, так как при управлении этими ЛА необходимо оперативно и точно решать задачи пространственной ориентации и стабилизации. Для БПЛА важной задачей является выполнение программы полета, независимо от случайных возмущающих воздействий, возникающих в полете. В связи с этим остро стоит вопрос о построении эффективных алгоритмов управления для конвертоплана, который имеет три режима полета

(вертикальный, горизонтальный и переходный), каждый из которых отличается собственной спецификой и требует глубокого изучения со стороны разработчика.

На основе вышесказанного, в настоящей работе проведен анализ современного состояния исследований, касающихся вопросов особенностей конструкции и подходов к управлению БПЛА, выполненных по схеме конвертоплан.

1. Nonami K, Kendoul F, Suzuki S, Wang W, Nakazawa D. Development of autonomos quad-tilt-wing (QTW) unmanned aerial vehicle design, modeling, and control //Autonomous flying robots. 2010. С. 77-93.

2. Ge WZ. Control system design on the transition stage of quad tilt rotor aircraft. 2014. 126 с.

3. Oner KT, Cetinsoy E, Unel M, Aksit MF, Kandemir I, Gulez K. Dynamic model and control of a new quadrotor unmanned aerial vehicle with tilt-wing mechanism //World Acad Sci Eng Tech 2008. С. 58–63.

4. Chowdhury AB, Kulhare A, Raina G. A generalized control method for a tilt-rotor UAV stabilization //Proceedings of the 2012 IEEE international conference on cyber technology in automation, control, and intelligent systems. 2012. С. 24-32.

5. Flores GR, Escareno J, Lozano R, Salazar S. Quad-tilting rotor convertible mav: Modeling and real-time hover flight control // Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2012. С.65-71.

6. Carlson EB. Optimal tiltrotor aircraft operations during power failure. Minneapolis: University of Minnesota; 1999. 180 с.

## Разработка методики оценки надежности систем заправки ракет космического назначения

Батиков А.А.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Гончар А.Г.
МАИ, Москва
sanek_batikov@mail.ru

Тема данной научно-исследовательской работе посвящена исследованию проблем надёжности систем заправки (далее – СЗ) ракеты космического назначения – одной из важнейших систем на стартовом комплексе, без которой невозможно осуществить пуск.

В данной работе была поставлена цель рассмотреть возможность создания общей методики определения надежности системы заправки ракет космического назначения, в рамках которой решались следующие задачи:

1) сбор и анализ информации о том, как рассматривается надёжность в технике в целом, какими свойствами она определяется, что в себя включает и т.д.;

2) анализ сложившегося порядка задания требований к надежности систем за-правки на различных стадиях их жизненного цикла;

3) идентификация и оценка возможных рисков, связанных с эксплуатацией СЗ, а также предложения по защите эксплуатирующего СЗ персонала в ситуациях, связанных с реализацией рисков;

4) определение основных количественных показателей надежности (далее ПН) в методике оценки надежности систем заправки и анализ некоторых из них.

Для многих систем безотказность, ремонтопригодность и готовность являются важнейшими характеристиками.

Термины «надежность», «безотказность», «опасность» и «риск» часто смешива-ют, при этом их значения перекрываются. Часто термины «анализ безопасности» или «анализ опасности» используются как равнозначные понятия. Наряду с термином «анализ

надежности» они относятся к исследованию как работоспособности, отказов оборудова-ния, потери работоспособности, так и процесса их возникновения.

Выбор и обоснование, как классификация и структура ПН, а также их нормирование должны включать в себя комплекс мероприятий, в том числе: выбор номенклатуры вероятностных ПН, обоснование численных значений ПН СЗ и их составных частей, формулирование критериев отказов и предельных состояний, задание требований к надежности, к конструкции системы заправки, техническому обслуживанию, действиям персонала, направленным на обеспечение надежности. Для получения достоверных результатов в процессе анализа требуется рассматривать все возможные воздействия на надежность системы со стороны: аппаратных средств, программного обеспечения, человеческого фактора и организационных действий.

Выбор метода анализа надежности является очень индивидуальным и осуществляется объединенными усилиями экспертов по надежности и эксплуатации системы. Выбор производится на ранних этапах разработки программы и исследован на применимость.

[1] ГОСТ Р 56526-2015 Требования надежности и безопасности космических систем, комплексов и автоматических космических аппаратов единичного (мелкосерийного) изготовления с длительными сроками активного существования – М.: Стандартинформ, 2016, 50 с.

## Управление группой БПЛА и их применение

Белов А.И.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Малышев В.В.
МАИ, Москва
anton3103@gmail.com

На сегодняшний день тема управления группой беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) становится все актуальнее. В связи с развитием самих БПЛА, способов управления ими и их применения все больше как военных, так и гражданских организаций и компаний проявляют интерес к этой теме.

Групповое или смешанное применение (применение вместе с пилотируемой авиацией) БПЛА может существенно повысить вероятность успешного выполнения задания, а также эффективность всей системы во время его выполнения.

Управление группой делится на централизованное и децентрализованное. При централизованном управлении команды для группы отдает один из БПЛА, который является лидером группы, а все остальные его ведомыми. В децентрализованном варианте все БПЛА участвуют в управлении группой, и все просчитывают реакцию на то или иное событие, но это также вызывает сложности в координации действий каждого отдельного БПЛА.

Возможности применения группы БПЛА очень и очень широкие. Взаимодействуя друг с другом и/или с пилотируемой авиацией, они могут выполнять задачи слежения и поиска, передачи сигнала на большие расстояния, используя друг друга в качестве ретрансляторов, использоваться для поддержки наземных сил во время военных операций и наносить удары по целям, прикрывая друг друга, или распределяться по целям, тем самым увеличивая площадь поражения.

Один из примеров такого применения являются поисково-спасательные работы, в них группа БПЛА может разделиться для поиска пострадавших или потерявшихся людей в определенной зоне, совместное использование нескольких БПЛА позволит уменьшить время, необходимое для обследования зоны и увеличить ее радиус. При этом данные со всех БПЛА будут стекаться в единый информационный цент, что упростить их обработку, систематизацию и ускорит реакцию служб спасения при выявлении пострадавших.

Тема управления группой БПЛА является перспективной и может помочь решить много важных и непростые задачи. Но она все еще требует развития и разработки. На сегодняшний день нет единого решения или концепции, есть только отдельные примеры решений данной проблемы и их исполнения на практике.

## Уборщики космического мусора

Бидеева М.А.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Береговой В.Г.
МАИ, Москва
bideeva.madina@mail.ru

Реальность такова, что любая деятельность человека сопровождается образованием предметов, потерявших потребительские свойства, т.е. мусора. Проблема утилизации мусора огромная проблема на Земле. С развитием космической эры, не обошла эта проблема и космическое пространство. Т.к. космическая деятельность быстро развивается, следовательно мусора становиться все больше и больше.

Казалось бы, космос — пространство огромное и мусор в нем — капля в море. Но это важный вопрос безопасности как для функционирующих спутников на орбите, так и для человека, что на Земле, что в космосе. Так, известно, что современные космические аппараты способны выдержать попадание микрометеоритов диаметром лишь до 1 см. Космонавты, работающие на МКС тоже подвергаются опасности, поэтому высота орбиты МКС постоянно корректируется. Людям на Земле тоже есть о чем беспокоиться: иногда космический мусор падает на Землю и вполне может убить.

В настоящее время, наиболее засоренными орбитами являются низкая околоземная орбита(НОО), геостационарная орбита(ГСО) и солнечно-синхронные орбиты(ССО), так как именно они чаще всего используются для работы космических аппаратов. Так, в районе НОО находиться около 300 тысяч техногенных объектов, из которых объектов поперечником более 1 см около 100 тысяч. И лишь небольшая их часть отслеживается с помощью наземных радиолокационных средств. Так как эти объекты движутся с огромным запасом кинетической энергии, их столкновение с любым космическим аппаратом может вывести его из строя. Поэтому орбиту Земли, засорение которого длится уже более 60 лет, надо срочно очищать от космического мусора.

Целью данной работы является рассмотрение существующих проектов по уборке космического мусора. Определение плюсов и минусов каждого проекта. На основе рассмотренных проектов, спроектировать свой аппарат по уборке космического мусора.

## Эффект смещения следов лучей ДН на поверхности Земли в многоканальных режимах съемки космических РСА

Булыгин М.Л.
Научный руководитель — к.т.н. Орлов В.П.
МАИ, Москва
Bulygin04@gmail.com

Реализация в космическом радиолокаторе с синтезированной апертурой (РСА) на безе цифровой активной фазированной антенной решетки (АФАР) многоканальных режимов съемки требует применения в такой системе сверхширокополосных зондирующих сигналов. При этом зондирующий импульс представляет собой пачку из нескольких линейно частотно-модулированных суб-импульсов, каждый из которых имеет свою несущую частоту. Таким образом в процессе зондирования цифровая АФАР должна перестраиваться на поднесущую частоту каждого суб-импульса для его излучения в требуемом направлении, поскольку

положения аналоговых фазовращателей АФАР должны быть выбраны исходя из номинального значения несущей частоты сигнала. В противном случае (если частота излучаемого сигнала отлична от частоты, на которую настроена АФАР) луч диаграммы направленности (ДН) будет естественным образом отклоняться. При разнесении поднесущих зондирующего сигнала на 400-500 МГц, отклонение лучей может достигать половины ширины ДН – что ведет к ухудшению характеристик радиолокационного визирования в многоканальных режимах съемки.

Данный эффект на передачу может быть нивелирован своевременной сменой положений аналоговых фазовращателей по апертуре АФАР, поскольку зондирующие

суб-импульсы излучаются последовательно во времени. Однако на прием эхо-сигнал каждого луча ДН регистрируется АФАР одновременно, что исключает возможность перестройки аналогового тракта АФАР как при излучении. В результате результирующая приемо-передающая ДН каждого луча будет искажаться, а степень искажений будет характеризоваться номинальным углом отклонения луча ДН от нормали, реализуемого аналоговыми фазовращателями, и величиной разности частоты, на которую настроена АФАР, и поднесущей частоты принимаемого сигнала. В конечном счете данный эффект ведет к ухудшению энергетических характеристик радиолокационного визирования и уменьшению размеров визируемого участка местности за счет некомпенсированного смещения следов лучей ДН на поверхности Земли.

Для оценки влияния описанного эффекта на конечные характеристики радиолокационной съемки создана модель, имитирующая работу бортовой аппаратуры с учетом специфики функционирования в многоканальных режимах съемки. В результате моделирования установлено, что при номинальном отклонении луча ДН на 15 градусов от нормали по вертикали и реализации 2-х канального (разнесение лучей по горизонтали) прожекторного режима съемки, дополнительные энергетические потери составляют около 0,6 дБ, а уменьшение результирующего размера кадра по горизонтальной дальности достигает 25%. При допущении энергетических потерь на 1 дБ указанное уменьшение размеров кадра полностью устраняется.

При реализации 4-х канального сканирующего режима съемки, где частотное отклонение от центральной частоты будет больше, чем в предыдущем примере, энергетические потери увеличиваются до 1,4 дБ. Однако за счет специального чередования номиналов поднесущих частот, используемых в каждом канале, удается практически полностью исключить влияние «смещения» лучей на суммарный размер полосы съемки, а саму съёмку вести без пропусков.

Таким образом, применение многоканальных режимов съемки требует учета описанного эффекта смещения следов лучей разных каналов на поверхности Земли при формировании алгоритмов функционирования бортовой аппаратуры и планировании многоканальной радиолокационной съемки Земной поверхности.

## Решение задач проектирования и модернизации систем термостатирования для ракет космического назначения

Бурмистров М.Д.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Торпачев А.В.
МАИ, Москва
boor1995@yandex.ru

Техническая документация — набор документов, используемых при проектировании (конструировании), создании (изготовлении) и использовании (эксплуатации) каких-либо технических объектов: зданий, сооружений, промышленных товаров, программного и аппаратного обеспечения.

Техническую документацию разделяют на несколько видов:

- конструкторская документация
- эксплуатационная документация
- ремонтная документация
- технологическая документация
- документы, определяющие технологический цикл изделия
- документы, дающие информацию, необходимую для организации производства и ремонта изделия

Технической документацией также может называться технический паспорт, техническое руководство или техническая литература.

Тема данной научно-исследовательской работы посвящена доработке конструкторской документации для системы термостатирования ракет космического назначения. Назначением данной системы является поддержание заданного температурного-влажностного режима в транспортно-пусковом контейнере и в самой ракете.

В данной работе была поставлена цель предложить вариант переработки техниче-ской документации по системе термостатирования для ракет космического назначения таким образом, чтобы она стала более удобной для ознакомления, а также понятнее для людей, специализирующихся в другой сфере профессиональной деятельности. В рамках заданных целей решались следующие задачи:

1) изучение существующей технической документации по системе термостатиро-вания;

2) поиск и анализ возможных улучшений или дополнений для данной технической документации;

3) предложение своих идей для улучшения конструкторской документации для системы термостатирования.

Работа с любой технической системой начинается с ознакомления с ее конструк-торской документацией. Чем понятнее и проще будет изложен данный документ, тем меньше времени понадобится человеку для осознания и понимания принципов работы той или иной системы. Человек, пишущий инструкцию, должен не только хорошо осознавать работу того агрегата, о котором он пишет, но также и то как преподнести эту информацию другому человеку максимально просто и понятно, без ошибок, четко и ясно.

## Обследование внутренней области баков при помощи систем виртуальной реальности

Васильев Л.А.
Научный руководитель — Токарев А.С.
МАИ, Москва
wanbergg@gmail.com

В своей работе я подниму тему развития одной из самых перспективных технологий современности. Научно-технический прогресс не стоит на месте и новые технологические изыскания продолжают появляться, однако, контроль внутренней стороны резервуаров, предназначенных для горючего и окислителя, всё ещё остаётся не самой простой задачей. Итак, речь пойдёт об устройствах виртуальной реальности, и о том, какую роль они могут сыграть в обследовании бака изнутри.

Прибор виртуальной реальности – это устройство, размещаемое на голове человека, обеспечивающее виртуальную реальность для зрителя. Обычно такой девайс включает в себя стереоскопический дисплей, стереозвук и датчики отслеживания движения головы.

С первого взгляда может показаться, что сложностей возникнуть не может - достаточно опустить камеру в бак и осветить его изнутри. Однако, внутри баков в ракетной технике не

всегда есть пространство для свободного спуска устройства, т.к. там обычно расположены трубопроводы подачи компонентов, наддува, различные решения, предотвращающие колебания топлива.

Ещё одной из проблем развития системы виртуальной реальности является её относительная простота: существует не так много элементов, которые представляется возможным улучшить при текущем уровне технического прогресса. Из этого следует вывод – должен наступить этап усложнения, в котором в устройство будут внедряться новые разработки, призванные помочь в улучшении конкретных параметров.

Тема данной работы не является окончательным этапом развития системы. В перспективе представляется возможным при необходимости добавить к системе виртуальной реальности так же устройства, внешне похожие на перчатки, позволяющие передавать движения руки человека на механический манипулятор, который так же можно установить на спускаемую в бак часть.

Что же касается стоимости оборудования, на данный момент бороскоп и камера высокого разрешения не будут играть сильную роль в цене, однако самый современный вариант VR техники ещё не был поставлен на конвеер.

Подводя черту, хотелось бы выразить надежду на то, что современная космонавтика не будет игнорировать возможности использования самых передовых технологий для повышения качества изделий, условий труда сотрудников отрасли, а так же во имя дальнейшего развития перспективнейших технологий, способных открывать новые и новые горизонты.

## Эскизный проект стартово-посадочного комплекса лунного базирования

Грабовский И.И.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Токарев В.А.
РГАТУ им. П.А. Соловьёва, Рыбинск
89097767331@mail.ru

Данная работа, имеющая эскизный характер, посвящена техническому воплощению идеи создания грузооборота Земля – Луна – Солнечная система, и представляет собой модель комплекса по добыче, переработке и доставке топлива к космическим кораблям. Комплекс включает в себя роботов разработки реголита, роботов транспортировки, лаборатории переработки и терминала обслуживания. Конструктивные элементы комплекса в виде геометрической модели представлены в 2017 году в материалах конкурса «Будущие асы цифрового машиностроения» в номинации «3D-проектирование. Студенческие проекты» (http://edu.ascon.ru/main/competition/gallery/items/?bm_id=65113).

Принцип работы этого комплекса заключается в наличии на Луне уникального изотопа гелия (гелия три), который можно использовать не только для управляемого термоядерного синтеза, но и для получения в процессе его десорбции ряда необходимых побочных продуктов. Наличие этих химических элементов и соединений позволяет синтезировать топливо для космических кораблей, автоматических межпланетных станций и зондов, что позволит обеспечить топливно-энергетическую независимость лунных баз.

Терминал выполняет роль спускаемого аппарата, лаборатории по переработке сырья, родительского корабля и диспетчерской башни. Терминал несёт в себе роботов-разработчиков грунта и роботов доставки в лабораторию на своём борту. Он обладает системой мягкой посадки, а также солнечными батареями для нормального функционирования всех электронно-вычислительных и телеметрических систем. Имеет радиоантенну для контроля зоны посадки и мониторинга орбитальной группировки Луны. В этом заключается его работа как диспетчера космических перелётов.

Разработчики грунта, находящиеся на борту терминала, выезжают на выработку гелия три из лунного реголита. В своих внутренних заводах они охлаждают гелий три практически до температуры космоса, и собирают побочные продукты десорбции в газовые баллоны.

Роботы-доставщики забирают баллоны с газом и отвозят их в лабораторию терминала. Часть побочных продуктов, не востребованная лабораторией, уходит в шахты захоронения. Переработанное лабораторией сырьё превращается в топливо и доставляется в места посадки космических аппаратов. В качестве горючего применяется получаемый гидразин, в качестве окислителя – тетраоксид диазота. Данное топливо образуется путём химических реакций, которые осуществляются в лаборатории комплекса с помощью перегона жидкостей из сосуда в сосуд под воздействием облучения, электризации и охлаждения.

Преимуществами данной системы являются:

· отсутствие места посадки и наличие района посадки. Это означает, что нет необходимости в высокоточной посадке космических кораблей и аппаратов;

· наличие мобильных роботов разработки и доставки позволяет вести добычу полезных ископаемых в любом месте на лунной поверхности;

· возможность обеспечения технической и энергетической поддержки космических кораблей, вне зависимости от их расположения на Луне.

## Анализ закономерностей развития конструкций ЖРД

Гущин Г.А.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Ревенков А.В.
МАИ, Москва
georgygushin@gmail.com

С момента начала освоения космического пространства до сих пор перед инженерами стоит проблема: вывести полезную нагрузку в космос с наименьшими затратами. То есть, сделать запуск более экономичным с точки зрения финансирования, использовать топливо, которое повысит эффективность двигательной установки, и достигнуть идеального результата в конструкции камеры сгорания.

Наиболее важными параметрами в КС являются: температура, давление топливной смеси внутри КС, удельный импульс и тяга. Эти параметры во многом определяют размеры и массу ДУ, цели использования. То есть чем выше температура сгорания топливной смеси, тем выше давление в КС. Высокое давление обеспечивает большую степень расширения рабочего тела, благодаря чему могу быть достигнуты высокие значения удельного импульса.

В процессе развития ЖРД инженерам приходилось решать большое количество сложных технических задач. Одной из таких являлась необходимость увеличения температуры, давления и скорости истечения газов из камеры сгорания. При этом возник рад противоречий: чем больше давление в КС, тем лучше смесеобразование, тем больше полнота сгорания, но в этом случае возникают высокочастотные колебания давления газов и КС быстро разрушается; температура в камере сгорания должна быть большой, но не должна быть слишком высокой, чтобы камера не разрушалась

Материалы данной работы направлены на описание закономерностей развития технической системы для того, чтобы попытаться спрогнозировать возможные направления совершенствования ЖРД, а так же наметить возможные варианты решения существующих на данный момент проблем.

# Оптимальное управление космическим аппаратом в атмосфере Марса при использовании рикошетирующих траекторий

Дорофеев В.С.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Волосатова Т.М.
МГТУ, Москва
nfy357@gmail.com

Исследуется оптимальное управление КА при использовании рикошетирующих траекторий для КА «несущий корпус» и баллистического типа. Для оценки эффективности снижения скорости КА до ввода в действие системы мягкой посадки, определение оптимального управления КА и определение номинальной траектории исследуются двухпараметрические способы управления спускаемыми аппаратами в атмосфере Марса при помощи совместного управления углами крена и атаки, неуправляемый спуск и спуск с балансировочным углом атаки.

Рассматривается конечный участок спуска КА, который начинающийся с момента достижения аппаратом максимальной высоты после полета по рикошетирующей траектории и завершается с момента ввода в действие системы мягкой посадки.

С использованием необходимых условий оптимальности принципа максимума Понтрягина определены оптимальные траектории движения при управлении КА в процессе спуска в атмосфере Марса. В качестве критериев оптимальности рассматривались минимум конечной скорости, максимальной перегрузки и температуры КА в конце участка аэродинамического торможения.

Реализован алгоритм управления КА с рикошетирующими траекториями при помощи углов атаки и крена при сохранении условий $V_k \to \min$, $n_{max} \to \min$, $T_{max} \to \min$ для КА типа несущий корпус.

Численное моделирование показало, что предложенный оптимальный алгоритм управления углом крена и углом атаки с рикошетирующими траекториями дает существенный выигрыш по ряду ключевых параметров при спуске КА в атмосфере Марса. Данный алгоритм позволяет:

- Значительно снизить значения максимальной перегрузки по сравнению с неуправляемыми баллистическим и планирующим спусками.
- Исключить перегрев корпуса КА вследствие малых значений перегрузки.
- Достичь существенной максимизации продольной дальности полета.
- Получить приемлемую конечную скорость КА до ввода в действие системы мягкой посадки.

Результаты исследований показывают, что рикошетирующие траектории дают возможность неограниченно максимизировать продольную дальность полета при выполнении условий по перегрузкам и конечной скорости. Использовать такой способ необходимо, когда другие пути нерациональны или невозможны.

# Синтез оптимального управления высокоорбитальной группировкой космического комплекса ГЛОНАСС с использованием кватернионной модели движения КА

Закиров А.Ю.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Федоров А.В.
МАИ, Москва
zakirov.anton@yandex.ru

В рамках дальнейшего развития орбитального сегмента глобальной спутниковой навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС рассматривается возможность развертывания регионального высокоорбитального космического комплекса (ВКК), состоящего ориентировочно из 4-6 космических аппаратов на суточных наклонных орбитах с эксцентриситетом до 0.2.

ВКК обеспечит излучение навигационных сигналов в интересах повышения доступности и точности навигационных определений в отдаленных и труднодоступных регионах; ретрансляцию высокоточной эфемеридно-временной информации функциональных дополнений ГНСС.

Анализ моделирования возмущенного неуправляемого движения КА по орбитам рассматриваемого класса показывает, что имеют место долгопериодические возмущения гринвичской долготы восходящего узла (ГДВУ) трасс, вековые возмущения аргумента перигея, эксцентриситета, долготы восходящего узла и наклонения. Подобные возмущения обусловлены нецентральностью гравитационного поля Земли и Лунно-Солнечной гравитацией.

Целью исследования является разработка комплексного алгоритма стабилизации трасс орбитальной группировки, позволяющего формировать управляющие воздействия – потребные импульсы характеристической скорости и моменты проведения коррекций с учетом ее целевой эффективности и технических ограничений, обусловленных энергетическими характеристиками двигательной установки КА.

В работе предлагается использовать современные численные методы при моделировании управляемого возмущенного движения, которое осуществляется интегрированием уравнений Ньютона в абсолютной экваториальной геоцентрической системе координат (АГЭСК).

Традиционным подходом к решению задач, связанных с синтезом оптимального управления, является линеаризация нелинейных систем. Однако такой подход весьма трудоемкий с точки зрения численного поиска решения, так как могут присутствовать особые точки и тригонометрические функции.

Поэтому предлагается использовать альтернативный подход к синтезу алгоритмов управления движением КА, основанный на использовании кватернионных форм уравнений Куустанхеймо-Штифеля пространственной задачи двух тел.

В отличие от классических моделей, кватернионные не имеют особых точек (не вырождаются для любых положений тела в пространстве), не содержат тригонометрических функций, наличие которых осложняет аналитическое и численное решение задач управления движением, имеют линейные или близкие к линейным структуры. Применение кватернионных моделей также повышает эффективность численного решения задач навигации и управления движением.

Поиск и построение оптимальных управлений и траекторий КА возможно осуществлять на основе регулярных кватернионных уравнений задачи двух тел. При поиске решения возможно получить оптимальное управление, переводящее орбиту космического аппарата из начального положения в требуемое за фиксированное время. Решение можно найти для интегрального квадратичного функционала качества в отношении эйлерова угла

рассогласования начального и требуемого положения орбиты и проекции вектора абсолютной угловой скорости орбиты. Оптимальное управление может быть найдено в виде явной функции времени и истинной аномалии, а также параметров ориентации эйлеровой оси поворота орбиты.

## Система обеспечения запуска жидкостного ракетного двигателя в невесомости

Захаренко А.Д.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Ревенков А.В.
МАИ, Москва
sasha_zaharenko@mail.ru

Характерной особенностью работы двигательной установки (ДУ) в нормальных условиях является возможность их запуска при наличии положительной перегрузки, который обеспечивает постоянный контакт заборного устройства в баках с компонентами топлива и бесперебойную подачу. В условиях невесомости также необходимо многократное включение ДУ. Там возможно возникновение отрицательных и боковых перегрузок, поэтому приходится применять специальные меры для гарантированного запуска ЖРД. Для удовлетворения этих требований применяются специальные системы – системы обеспечения запуска (СОЗ).

Для обеспечения гарантированного забора топлива, необходимо чтобы:

1. Все топливо или его необходимое для запуска ДУ объем нахо-дится у заборного устройства
2. Газовые включение, которые могли проникнуть в жидкость, были удалены от заборного устройства и не допускались в этот район в процессе работы ДУ (бескавитационная подача топлива).
3. Колебания топлива у выходного отверстия были незначительны или совсем исключались, чтобы при работе не проник в топливную магистраль газ за счёт «оголения» заборного устройства.

В докладе рассмотрены:

- различные способы забора топлива в условиях невесомости и типы СОЗ.
- некоторые этапы развития СОЗ, проанализированы закономерности развития, которые проявились в процессе совершенствования конструкции.
- противоречия, встречающиеся при разработке.
- способы совершенствования СОЗ.

Цель работы: ознакомиться с имеющимися на данный момент СОЗ, проанализировать проблемы и противоречия, возникающие при разработке и эксплуатации, а также основываясь на закономерностях развития технических систем попытаться спрогнозировать возможные направления развития СОЗ для обеспечения запуска ЖРД в невесомости.

## Использование точек Лагранжа в космонавтике

Ильин В.В.
Научный руководитель — Токарев А.С.
МАИ, Москва
ilin.vladislav.v@mail.ru

Точки Лагранжа или, как еще их называют, точки либрации представляют собой большой интерес современной космонавтики, что связано с особенностями гравитационных сил в них.

Еще в XVIII веке Жозеф Луи Лагранж в рамках решения ограниченной задачи трех тел теоретически обнаружил пять точек, в которых равнодействующая всех внешних сил обращается в нуль. Три коллинеарные точки (L1, L2 и L3) расположены на одной линии, которая проходит через два небесных тела, а две треугольные (L4 и L5) образуют с телами два равносторонних треугольника.

Данные точки связаны, прежде всего, с системой Солнце-Земля и размещением в них астрофизических обсерваторий, например, европейский аппарат «Gaia» и американский «DSCOVR», которые уже работают там, или сменщик космического телескопа «Хаббл» - «Джеймс Уэбб» и российская обсерватория «Спектр-РГ», запуск которых запланирован на следующий год. Это объясняется тем, что в системе Солнца и Земли точка L2 - идеальное место для телескопа, так как наша планета практически полностью заслоняет собой свет от Солнца. А вот точка L1, наоборот, никогда не попадает в ее тень, что позволяет размещенному там аппарату постоянно наблюдать за звездой.

Не менее перспективной является и система Земля-Луна. Для космической станции, играющей роль промежуточного пункта при полетах на Луну, может быть использована точка L1, которая находится всего в 58 тыс. км от нее, а при полетах к другим объектам Солнечной системы – точки L4 и L5 (они обладают высокой стабильностью в отличие от коллинеарных точек). Наличие на таких станциях необходимых технических средств и запасов топлива существенно упростит экспедиции на естественный спутник Земли и обратно, а также позволит вести мониторинг и координировать перелеты и связь. В точку L2 можно поместить станцию-ретранслятор для связи с обратной стороной Луны, а также во второй точке может быть размещен радиотелескоп, в виду защищенности от помех с Земли.

Однако возможности использования точек Лагранжа не ограничиваются постоянным размещением аппаратов. В иностранной литературе встречается понятие «The Interplanetary Transport Network» (межпланетная транспортная сеть) или «The Interplanetary Superhighway» (Межпланетный Суперхайвей), которое предполагает систему переходов между орбитами с использование точек либрации. Данная система низкозатратна в плане топлива, но длительна по времени, и она может быть использована, в основном, с такими планетами, как Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун, а также с их спутниками.

## Андрогинно-периферийный агрегат стыковки (АПАС)

Кириллов С.А.
Научный руководитель — доцент, Токарев А.С.
МАИ, Москва
greshnik0502@yandex.ru

Андрогинно-периферийный агрегат стыковки – космический стыковочный механизм, используемый на МКС. Используется для стыковки челноков Шаттл и для соединения функционально-грузового блока "Заря" с герметичным стыковочным переходником РМА-1.

Для осуществления стыковки используется стыковочный узел, который в основном делится на два вида: "АПАС" и "штырь-конус".

Главное отличие установки "штырь-конус" - несимметричная система, то есть если у вас установлен "штырь", то стыковка возможна с кораблем, обладающим "конусом" и никак иначе.

Система "АПАС" позволяет произвести стыковку любого корабля с любым другим. Достаточно лишь того, чтобы оба корабля были оборудованы системами стыковки "АПАС"

Принцип стыковки - попасть стыковочным узлом одного корабля в узел другого. Узлы закрепляются, корабли плотно притягиваются шлюз в шлюз чтобы встать на замки.

Конструктор андрогинно-периферийного стыковочного узла - Владимир Сыромятников, основатель школы в области систем стыковки космических аппаратов.

Стыковочный узел позволил выполнить на орбите две стыковки советского и американского кораблей "Союз" и "Аполлон".

Стыковка осуществлялась двумя агрегатами, один из которых играл активную роль, другой - пассивную. Ранее стыковка осуществлялась по принципу "штырь-конус".

Основные темы доклада: принцип работы, разновидности, схема конструкции, устройство агрегата, достоинства и недостатки, АПАС -75, АПАС-89, АПАС-95, другие стыковочные системы и их развитие на данный момент.

## Разработка алгоритмов и программного обеспечения обработки информации от одноэлементного самолетного сканера

Ковалев Ф.А.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Малышев В.В.
МАИ, Москва
f9060341129@gmail.com

Разработка алгоритмов и программного обеспечения обработки информации от одноэлементного самолетного сканера.

Существует множество природоресурсных задач дистанционного зондирования земли (ДЗЗ): поиск рыбы, мониторинг ледовой обстановки, мониторинг экологической обстановки, мониторинг паводковой ситуации и др. Для решения этих задач проводится сьемка с многоуровневых средств наблюдения: космический аппарат (КА), летательный аппарат (ЛА), беспилотный летательный аппарат (БПЛА), различные зонды. На все эти летательные аппараты устанавливается аппаратура для сбора информации.

Так как на ЛА, в котором установлена съёмочная аппаратура и проводится съёмка, могут влиять разные внешние возмущающие факторы, например, погодные условия, то данные, получаемые с аппаратуры дистанционного зондирования не идеальны. Для дальнейшего использования они подвергаются двум этапам обработки: предварительной и тематической.

Предварительная обработка необходима для конвертации исходного изображения из уникального формата присущего определенной аппаратуре в стандартный формат и устранение при этом шумов и помех, а также для проведения географической привязки.

Тематическая обработка необходима для выделения поисковых признаков.

В работе поставлена задача: Выделить зоны, приуроченные к скоплению углеводородов (УВ). Решение поставленной задачи предполагает выделение поисковых признаков специализированными алгоритмами обработки изображений. Имеющиеся на сегодняшний день алгоритмы такого типа базируются на преобразованиях высокочастотной фильтрации (ВЧ), низкочастотной фильтрации (НЧ), гистограммных преобразованиях.

Для сравнения эффективности работы проводилась фильтрация при разных задаваемых параметрах. Приведен иллюстративный пример, в котором сравнивались результаты работы в программах Matlab и Digitizer. Было взято тестовое изображение, которое было повернуто на 90 градусов.

Выполненный этап работы позволил убедиться в качестве работы НЧ – фильтрации специализированной геоинформационной системе (ГИС) Digitizer со стандартной общепринятой системой Matlab. Рассматривались НЧ – фильтры: Гаусса и Медианный фильтр. В качестве объекта обработки использовались специализированные изображения, содержащие высокие и низкие пространственные частоты. В результате получили следующие выводы: специализированная программа Digitizer работает значительно быстрее, результат обработки при одинаковых начальных условиях совпадает. Диапазон параметров фильтрации в системе Matlab значительно превосходит аналогичный диапазон параметров в Digitizer, что позволяет сделать вывод о предпочтительном использовании специализированных систем в производственных условиях. При повороте изображения в

программах Digitizer и Matlab ничего не изменилось. Следовательно, направление полета самолета при сьемке значения не имеет.

## Возможность комплексного задействования наземного и космического контуров управления низколетящими космическими аппаратами

Кусова В.Р., Манушичев С.Ю., Баранова И.С.
Научный руководитель — Овечко В.М.
ФГУП ЦНИИмаш, Москва
miakusova9@gmail.com

Комплексы управления космическими аппаратами (КА) и реализованные технологии управления далеко не единственные компоненты системы управления космическими объектами. В случае, когда функционирование КА происходит в штатном режиме, операции по управлению КА стандартизированы и описаны в соответствующих инструкциях.

В процессе управления КА может возникнуть необходимость оперативной выдачи управляющих команд на борт. Такая необходимость может возникать по причине изменения планов задействования целевой аппаратуры, при нештатных ситуациях. Она влечет за собой изменение планов задействования средств управления КА.

Требование быстродействия при выдаче управляющих команд порождает задачу поиска путей обхода ограничений, накладываемых зонами радиовидимости наземных станций. В этом случае, использование в составе контура управления аппаратами спутниковых средств ретрансляции увеличивает зону радиовидимости низколетящего спутника, давая возможность передавать на него команды управления.

При использовании в контуре управления средств ретрансляции важно уметь определять ситуации, при которых задействование спутниковых средств управления целесообразно. Другими словами, необходима разработка критериев эффективности комплексного задействования наземного и спутникового контуров управления.

Исследование возможности комплексного задействования наземных и спутниковых средств управления не представляется возможным без использования системы компьютерного моделирования. Построение такой системы предлагается осуществить по модульному принципу, обеспечивающему возможность доработки и модернизации отдельных компонентов системы независимо друг от друга.

Для оперативного построения плана задействования средств управления аппаратами группировки КА требуется алгоритм, решающий поставленную задачу за минимально возможное время. В работе предлагается подход с использованием теории графов.

Данная работа описывает организацию управления космическими аппаратами больших орбитальных группировок при комплексном задействовании космических и наземных средств управления.

## Разработка и применение модифицированных алгоритмов управления движением ракеты-носителя на начальном участке полета для снижения стоимости запусков

Людомир А.В., Трифонов М.В.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Бобронников В.Т.
МАИ, Москва
alyudomir@yandex.ru

В условиях плотной конкуренции на мировом рынке по услугам коммерческих запусков ракет-носителей (РН), одной из актуальных задач в настоящее время является снижение

стоимости выведения полезной нагрузки в космическое пространство, в том числе за счет снижения затрат на содержание и ремонт сооружений стартового комплекса (СК). Такая задача может быть решена с использованием модифицированных алгоритмов управления движением РН на начальном участке полета.

Стоимость инфраструктуры СК в десятки раз превышает стоимость РН, поэтому целесообразно уделять особое внимание разработке модифицированных алгоритмов управления движением РН на начальном участке полета для повышения требований сохранности СК, среди которых можно выделить:

1)требование минимума термодинамических нагрузок на сооружения СК, оказываемых газодинамическими струями (ГДС) РН и сокращающих эксплуатационный ресурс конструкций СК;

2)требование минимизации влияния взрывной волны на сооружения СК и капсулы с пассажирами (при пилотируемых стартах) в случае отказа одного из двигателей РН и ее увода по заданной траектории в точку ликвидации;

3)требование безударности РН с сооружениями СК при пролете кабельно-заправочной башни как в штатном, так и в аварийном полетах.

В качестве объекта исследования в работе рассматривается система управления (СУ) движением РН на начальном участке полета.

Целью работы является разработка и применение модифицированных алгоритмов управления движением СУ РН на начальном участке полета, способствующих снижению стоимости запусков РН путем повышения требований сохранности СК.

В данной работе ставилась задача разработки оптимальных регуляторов СУ РН, позволяющих помимо отслеживания основной «тангажной» программы так же:

1)отслеживать заданную программу положения ГДС РН на стартовой плоскости при штатном полете;

2)отслеживать траекторию характерных точек РН при ее движении по заданной уводящей траектории в точку ликвидации при отказе одного из двигателей.

На предварительных этапах решения задачи, движение РН на начальном участке полета может быть описано с помощью линеаризованной системы уравнений с переменными коэффициентами.

В работе рассматривается модифицированный вариант задачи слежения, в дальнейшем эту модификацию будем называть обобщенной задачей слежения. Особенность такой задачи заключается в зависимости вектора выхода системы от вектора управления. В качестве критерия оптимальности используется квадратичный терминально-интегральный критерий.

В качестве основных выходов системы рассматриваются:

-положения следов осей струй РН на стартовой плоскости при штатном полете;

-положения проекций характерных точек корпуса РН на стартовую плоскость при отказе одного из двигателей.

В качестве управляющих переменных системы рассматриваются:

-угол поворота сопел двигателей $\delta i$ при штатном полете;

-командные отклонения РН по углам тангажа и рыскания при отказе одного из двигателей.

Первым этапом численного решения задачи является расчет коэффициентов регуляторов СУ РН путем интегрирования дифференциального матричного уравнения Риккати. Вторым этапом является моделирование движения РН с использованием на каждом шаге интегрирования рассчитанных ранее значений коэффициентов на первом этапе.

Таким образом, в работе разработаны модифицированные алгоритмы управления движением РН на начальном участке полета, способствующие снижению стоимости запусков РН за счет сокращения затрат на ремонт и обслуживание сооружений СК. В работе с использованием разработанных алгоритмов решены две задачи: увод ГДС РН от сооружений СК в штатном полете для увеличения их эксплуатационного ресурса и увод РН

по при отказе одного из двигателей РН для ее безопасной ликвидации. В ходе решения обобщенной задачи слежения проведен структурный и параметрический синтез законов управления РН.

Работоспособность и эффективность полученного решения подтверждена численными результатами моделирования: величина отклонений проекций траекторий ГДС РН и характерных точек РН на горизонтальную плоскость от требуемых траекторий не превышают допустимые пределы.

В работе приводится оценка экономической эффективности применения разработанных алгоритмов управления движением РН в рамках проблемы сокращения стоимости запусков РН.

## Развитие конструкции гребного винта как движителя двухсредных аппаратов

Малофеев В.Б.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Ревенков А.В.
МАИ, Москва
Malofeev.vlad@yandex.ru

При проектировании двухсредных аппаратов одной из важнейших задач является выбор конструктивных параметров движителя при движении аппарата в воде и определение режимов его работы.

В наиболее важные свойства торпед входит: высокая точность, дальность действия, скорость движения и низкий уровень шума. Эти свойства во многом зависят от принципа действия и конструкции движителя. Чем выше скорость вращения гребного винта, тем большее расстояние сможет пройти торпеда. Однако при высоких оборотах винта в жидкой среде на поверхности начинает возникать эффект кавитации.

Кавитация возникает в результате местного понижения давления в жидкости, которая происходит при увеличении её скорости. Перемещаясь с потоком в область с более высоким давлением или во время полупериода сжатия, квитанционный пузырёк захлопывается, излучая при этом ударную волну. Ударная волна создаёт колебания отличающиеся сложностью временной и спектральной структуры, что ведёт к повышению уровня шума и возможности раннего обнаружения боевого снаряда. Таким образом, появляется противоречие: необходимо повышать скорость вращения винта, чтобы увеличить дальность стрельбы и нельзя повышать скорость вращения винта, чтобы не возникало высокого уровня шума.

В докладе рассмотрены:

- некоторые этапы развития гребных винтов, проанализированы закономерности развития, которые проявились в процессе совершенствования конструкции.
- способы совершенствования конструкции винтов.

Основываясь на закономерностях развития технических систем, сделана попытка спрогнозировать возможные направления развития гребных винтов для обеспечения требуемых свойств двухсредного аппарата и уменьшения влияния кавитации на КПД движителя.

# Структура и алгоритмы программного комплекса решения задачи распределения средств управления космическими аппаратами

Манушичев С.Ю., Кусова В.Р., Поливников В.М.
Научный руководитель — Овечко В.М.
ФГУП ЦНИИмаш, Москва
stas@manushichev.ru

Постоянно растет число космических аппаратов (КА) в околоземном космическом пространстве. Развитие технологий обуславливает исследования по направлениям применения малых спутников для решения задач в интересах сельского хозяйства, геодезии, служб мониторинга чрезвычайных ситуаций и других отраслей.

Рост количества аппаратов на низких околоземных орбитах требует новых подходов к построению систем управления, в частности – при решении задачи распределения наземных (а в перспективе и космических) средств управления КА. С точки зрения алгоритмов, такая задача включает в себя необходимость знания положения космического аппарата в пространстве, методы расчета зон радиовидимости (ЗРВ) между объектами, алгоритмы распределения средств управления между аппаратами группировки. С точки зрения архитектуры программного комплекса, решение задачи предполагает построение базы данных, разработку способов взаимодействия между оператором и системой, создание интерфейсов взаимодействия компонентов системы друг с другом.

Описываемый программный комплекс разрабатывается в клиент-серверной архитектуре и состоит из четырех подсистем:

1. Подсистема работы с базой данных (БД) должна использовать технологию объектно-реляционного отображения (ORM), обеспечивая интерфейс для CRUD-операций над данными без необходимости писать SQL-код для взаимодействия с таблицами и полями БД.
2. Подсистема баллистических расчетов требуется для реализации алгоритмов прогноза движения КА по заданным начальным условиям. Полученные прогнозы траектории космического аппарата должны использоваться далее для расчета ЗРВ, а также при графическом отображении информации.
3. Подсистема построения планов задействования средств управления необходима для построения квазиоптимального неконфликтного плана по введенным в систему исходным данным.
4. Подсистема ввода данных и отображения результатов должна обеспечивать взаимодействие с оператором в процессе заполнения форм данных, промежуточных проверок, вывода результатов расчетов.

Внутренняя часть (backend) описываемого комплекса разрабатывается на языке программирования Python 3.6 с использованием фреймворка Django 2.0. ORM позволяет использовать в качестве системы управления базами данных PostgreSQL, SQLite, MySQL и другие. Внешние интерфейсы системы (frontend) разрабатываются в виде веб-сервиса с использованием HTML, CSS, JavaScript, для работы клиенту системы нужен только браузер. Используемые алгоритмы и способ построение программного комплекса упростит процесс решения задачи распределения средств управления космическими аппаратами.

## Синхронизация цифровых сегментов бортовой аппаратуры в радиолокаторе космического базирования

Маркова А.С.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Заковряшин А.И.
МАИ, Москва
as.markova93@gmail.com

В современных системах радиолокации предъявляются всё более жёсткие требования к параметрам антенных систем. Улучшение характеристик космических РСА может быть достигнуто с помощью технолгии цифрового диаграммообразования. Однако, цифровое формирование ДН имеет свои сложности. Основная проблема, помимо высокой стоимости, заключается в регулировке и синхронизации цифровых сегментов антенной решетки.

Одним из способов обеспечения синхронизации всех сегментов бортовой аппаратуры является использование цифровой задержки сигналов, которая реализуется в цифровом тракте АФАР.

В передающем тракте задержка осуществляется путем создания линейного фазового набега в формируемых квадратурных составляющих ЛЧМ-сигнала.

В приемном тракте линейный фазовый набег, эквивалентный задержке, вводится в опорную функцию цифрового фильтра, осуществляющего фильтрацию сигнала данного канала. С помощью моделирования был выбран наиболее простой для реализации на ПЛИС вариант: линейный фазовый набег заменен на сдвиг импульсной характеристики фильтра на соответствующее требуемой задержке количество отсчетов.

Однако, рабочая тактовая частота АЦП не позволяет реализовать дискрет задержки, достаточный для синхронизации сигналов с требуемой точностью. Для повышения точности регулировки частота дискретизации рассчитываемой импульсной характеристики фильтра была увеличена. В связи с этим, реализация сдвига импульсной характеристики фильтра возможна одним из двух следующих способов:

1. Путем создания фильтра нижних частот (ФНЧ) на рабочей частоте с дальнейшей интерполяцией ИХ, сдвигом ИХ на необходимое количество отсчетов и прореживанием до реальной тактовой частоты АЦП;
2. Путем создания ФНЧ на увеличенной частоте дискретизации, с последующим сдвигом ИХ и прореживанием до реальной тактовой частоты АЦП.

Для выбора оптимального способа реализации сдвига ИХ фильтра на ПЛИС с уменьшенным дискретом были промоделированы оба подхода к синтезу фильтра.

Рассмотрены фильтры с разной шириной полосы пропускания. По результатам моделирования проведена оценка параметров АЧХ фильтров после процедуры сдвига ИХ. Параметрами для оценки АЧХ являются максимальное затухание в полосе пропускания и минимальное затухание в полосе задерживания. В результате было получено, что целесообразнее создавать фильтр на высокой частоте дискретизации, а затем прореживать ИХ фильтра до реальной частоты дискретизации, т.е. тактовой частоты работы АЦП и тракта обработки сигнала в ПЛИС МФОС.

## Анализ развития систем разделения конструкции космических аппаратов

Минашкин А.Д.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Ревенков А.В.
МАИ, Москва
sashamina@rambler.ru

Одной из важнейших служебных систем космического аппарата является система разделения конструкции. Она представляет собой комплекс устройств, обеспечивающих

жёсткое крепление частей конструкции в процессе наземной и лётной эксплуатации, а также их разделение на активном участке с заданными параметрами и в заданное время. Эти устройства производят разделение ступеней ракеты-носителя на активном участке, сброс отработавших элементов конструкции, отделение космической головной части от ракеты-носителя и приведение космического аппарата в рабочее положение.

К системе разделения конструкции предъявляются высокие требования по надёжности, простоте конструкции устройств; минимальным массе и габаритным размерам; максимально возможным осевым нагрузкам; отсутствию ударных нагрузок и осколков при срабатывании, которые могут вывести из строя космический аппарат. Для обеспечения надёжности элементов системы разделения желательна возможность их многоразового срабатывания — для проведения испытаний и подбора идентичных по характеристикам устройств, что, в свою очередь, обеспечивает минимальные угловые скорости.

В настоящее время разработано несколько видов устройств, осуществляющих крепление и разделение частей конструкции космического аппарата. Каждое из которых имеет свои преимущества и недостатки.

В докладе проведён анализ некоторых устройств систем разделения, сделана попытка выявления приёмов, которые использовались для совершенствования устройств системы и закономерностей их развития.

## Исследование конструкции переходных отсеков по данным южно-корейского ракеты-носителя

Пак Сонги, Юн Сон Ук
Научный руководитель — профессор, д.ф-м.н. Гришанина Т.В.
МАИ, Москва; Сеул, Республика Корея
haaz7790@naver.com

В данной работе рассматривается исследование конструкции переходных отсеков по данным южно-корейского ракеты-носителя.

В настоящее времия многие страны участвуют в разработке космических летательных аппаратов. В 2013 году Южная Корея запустила свою первую ракету KSLV-1(Korea Space Launch Vehicle-1), которая была построена совместно с российскими инженерами. По результатам успешного запуска KSLV-1 планируется создать полностью собственную ракету KSLV-2 до 2020 года. KSLV-1 – это двухступенчатая и KSLV-2 – трехступенчатая.

Переходный отсек многоступенчатой ракеты необходимо предохранять от повреждений при транспортировке. Конструкция переходного отсека зависит от способа разделения ступеней. При «горячем» разделении, когда двигатель последующей ступени включается перед отделением, отсек имеет переходную ферму для выхода газов. При «холодном» разделении корпус отсека выполняется сплошным. В конструкции переходного отсека KSLV исполюзуется коническая оболоченная. Ферменные переходные отсеки показаны на семейство ракеты-носителя Союз, Титан(Titan) и т.д. Ферменные конструкции достаточно просты в изготовлении, удобны в эксплуатации, отличаются высокой жесткосью(способностью воспринимать ударные нагрузки) и имеют другие достоинства.

В предлагаемом исследовании проводится модифицирование конструкции переходных отсеков южно-корейского ракеты-носителя, получаются результаты анализа с помощью расчета для массы и других характеристики ракет, а также проводится сравнение полученных результатов.

Список литературы

1. Грабин Б. В., Давыдов О. В., Жихарев В. И. Основы конструирования ракет-носителей космических аппаратов. М., 1991.

2. Шклярчук Ф. Н., Гришанина Т. В. Применение метода отсеков к расчету колебаний жидкостных ракет-носителей. М., 2017.
3. Cho Gwang-Rae [и др.] The Korean Sounding Rocket Program //Acta Astronautica - 2008. - № 12 - С. 706-714.
4. Lee Jun-Ho [и др.] A Numerical Analysis of Aerodynamic Characteristics and Loads for KSLV-II Configuration at the System Design Phase. Republic of Korea: 2013.

## Использование бетавольтаических источников питания в ракетно-космической технике

Проскурина И.П.
Научный руководитель — Токарев А.С.
МАИ, Москва
ira-proskurina@rambler.ru

Основным источником энергопитания космических аппаратов, выполняющих продолжительные миссии, удаленные от Солнца, является радиоизотопный термоэлектрический генератор энергии. Термоэлектрический генератор энергии – устройство, в котором посредством прямого преобразования тепловая энергия преобразуется в электрическую с использованием полупроводников. Радиоизотопные термоэлектрические генераторы (РИТЭГ) с 60-х годов активно используются в космической технике: серия ядерных вспомогательных источников SNAP, в качестве рабочих тел, использующих церием-144, полоний-210, кюрий-242; РИТЭГ для метеорологического спутника Sentry- на основе стронция-90; «многосотваттный РИТЭГ» MHW-RTG и модульный РИТЭГ GPHS-RTG на основе плутония-238; российские РИТЭГи семейства «Орион» на полонии-210. В качестве источника прямого преобразования тепловой энергии в электрическую может быть использован не только альфа-, но также и бета-распад. В результате этого распада ядра изотопа выбрасывают электроны (позитроны), ионизирующее излучение которых взаимодействует с полупроводником в области пространственного заряда, то есть происходит образование электронно-дырочных пар, как и в фотоэлектрических преобразователях, затем в области статического поля полупроводника электронно-дырочные пары порождают электрический ток. Энергия, необходимая для появления электронно-дырочной пары пропорциональна ширине запрещенной зоны полупроводника. Наиболее эффективными материалами полупроводников являются вещества с большой шириной запрещенной зоны, что гарантирует максимальные значения напряжения и минимальные значения токов утечки- карбид кремния, нитрид галлия и алмаз. Наиболее перспективными бета-источниками являются никель-63, тритий, прометий-147. Никель-63 по сравнению с другими обладает следующими преимуществами: излучение чистых бета-частиц (без гамма-квантов), наибольший период полураспада (100 лет), высокая удельная активность 59 Ки/г, энергия бета-частиц меняется от 18 кэВ до 67 кэВ (намного ниже порога дефектообразования в алмазе), безопасность, высокая энергоёмкость. Основными недостатками изотопа являются сложная технология производства (не существует в природе), высокая стоимость (~400000$/Ватт), низкий КПД (0,95%). Никель-63 рационально получать путем бомбардирования нейтронами никеля-62 с дальнейшим нагреванием до температуры кипения для образования высокой концентрации нужного изотопа, так как естественным путём этот изотоп образуется лишь в количестве 3-4% в обычном никеле. Никель-62 встречается в природе, основные месторождения никелевых руд в России сосредоточены в Мурманской области. Еще одна причина высокой стоимости связана с формированием сложной структуры бетавольтаического элемента. Низкий КПД обусловлен тем, что только первичные электроны (18 кэВ) способны проникнуть в полупроводник (алмаз), то есть половина упавших на образец электронов не участвует в порождении тока.

Недостатки образования элемента могут быть решены путем оптимизации производства и усовершенствования чистоты донорно-акцепторного процесса (увеличения числа взаимодействующих с полупроводником электронов).

## Повышение адгезионной прочности соединения титан-полимер в металлополимерных композиционных конструкциях

Салтыков А.В.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Бабин С.В.
Ступинский филиал МАИ, Ступино
probele100@mail.ru

В настоящее время одним из актуальных направления применения титановых сплавов является изготовление на их основе слоистых композиционных материалов. металлполимерных конструкций. Большинство металлполимеров изготавливаются на основе алюминия. Однако, не смотря на то, что титан тяжелее алюминия, он (Ti) обладает рядом преимуществ: высокая удельная прочность, низкая теплопроводность. низкий коэффициент термического расширения, более высока чем у алюминия термостойкость.

За рубежом ведется активная разработка титанполимерных слоистых материалов и имеются определенные успехи в этой области. Отечественных аналогов такого рода материалов в настоящее время не существует, что подтверждает актуальность проблемы и необходимость проведения исследований и разработок в данном направлении. По сравнению с СИАЛ-1 с пределом прочности 800 МПа титанполимер на основе сплава ВТ23 имеет предел прочности в два раза больший 1500 МПа.

"Слабым" местом металлполимерных композиций является переходная граница соединения полимерный композит - металл. В настоящей работе исследовалась возможность повышения прочности адгезионного соединения в титанполимерном композите между титановым и полимерным композиционным материалом путем создания промежуточного капиллярно-пористого шероховатого слоя. Промежуточный пористый слой создавался методом плазменного напыления в инертной контролируемой среде с помощью насадка. Промежуточное покрытие состояло из двух слоев: подслоя толщиной 0.05-0.07 мм из пористого шероховатого титанового сплава ВТ1-0 и капиллярно-пористого слоя толщиной 0.1-0.12 мм из сплава ЭП 741. Структура и состав промежуточного слоя выбирались на основе исследований прочности связи компонентов композиции с титановой основой и стеклопластиковым композитом. Соединение титанового сплава с «покрытием-подслоем» (титановый сплав ВТ-20 – подслой ВТ1-0) имеет прочность связи при сдвиге МПа. Соединение капиллярно-пористый слой из сплава ЭП741 со стеклопластиком ВПС20 48 МПа. Разрушение титанполимерного композиционного материала ВТ20-ВТ1-0+ЭП741-ВПС20 происходит по слою связующего, что говорит о достигнутом пределе прочности на сдвиг данного соединения.

Проведенные исследования показали возможность повышения прочности адгезионного соединения компонентов металлполимерного композиционного материала Ti-стеклопластик методом плазменного напыления промежуточного слоя. Улучшение адгезионных свойств позволит повысить упруго-прочностные и эксплуатационные свойства титанполимеров.

## Повышение качества функционирования систем управления космическими аппаратами

Сергеев Д.В.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Блатиков Г.А.
МАИ, Москва
seriy.den@yandex.ru

Использование искусственных нейронных сетей в системах управления космическими кораблями является необходимостью в обозримом будущем. Такие системы управления позволяют принимать сложные решения без вмешательства человека. Такая особенность позволит значительно сократить время реагирования аппаратов на изменения внешних условий т.к. не потребуется посылать запрос в центр управления и ожидать ответа. Также при изучении дальнего космоса в случаи столкновении с ранее не изученным явлением, система сама сможет проанализировать и принять решение, которое будет иметь самую большую вероятность благоприятного исхода, основываясь на уже известных данных. Аппараты на протяжении своего цикла функционирования смогут обучаться и совершенствовать систему управления.

Однако и такие совершенные системы не застрахованы от ошибок, в особенности на этапах своего создания. При попытке сделать совершенную модель, учитывающую все нюансы, имеется риск переобучения. При переобучении нейронная сеть утрачивает свою главную особенность - способность к обобщению данных. Такие системы хорошо адаптированы для работы с имеющимися данными, но совершенно не способны обрабатывать новые, не встречавшихся при обучении.

Для предотвращения проблемы переобучения применяют следующие подходы:

- увеличение числа примеров в обучающем множестве;
- введение контрольного множества;
- регуляризация весов;
- обучение нескольких нейронных сетей с последующим усреднением значения.

Но эти меры не могут гарантировать, что модель не окажется переобученной, поэтому исходные данные делятся на два набора: обучающий и тестовый. По тестовому набору производится оценка созданной модели. Самые распространённые это перекрестные проверки различных разновидностей. Так же метод разбиения данных позволяет сэкономить время и ресурсы, которые понадобились для сбора новых сведений, не фигурировавших в обучении модели с целью оценки ее точности и обобщающей способности.

Искусственные нейронные сети — это не новое направление науки об искусственном интеллекте. Однако активно внедряться и применяться на практике они стали относительно не давно, поэтому методы построения, обучения и проверки активно совершенствуются, а системам управления на их основе поручают все более сложные задачи, которые раньше невозможно было представить без участия человека.

## Этапы строительства и особенности устройства Международной Лунной Исследовательской Станции (МЛИС)

Сирота А.А.
МАИ, Москва
astrostarlover@gmail.com

Луна – единственный естественный спутник нашей планеты. Для дальнейшего освоения человечеством Солнечной системы неизбежно строительство исследовательской станции на поверхности Луны. В первую очередь, это будет означать новую ступень в развитии пилотируемой космонавтики. Мы сможем создать своеобразный аванпост за пределами

околоземной орбиты, перевалочный пункт для полётов на Марс, накопить необходимый опыт работы в условиях низкой гравитации, повышенного радиационного фона, относительной дали от Земли. Это возможность отработать технологию создания необходимых для обеспечения функционирования станции веществ (вода, кислород, строительные материалы) из местных ресурсов и технологию регулярных межпланетных перелётов.

Опираясь на опыт многолетнего совместного сотрудничества страны - участницы программы эксплуатации МКС (Россия, США, Япония, страны ЕС) должны объединить усилия в строительстве МЛИС. Данная кооперация позволит построить станцию в минимальные сроки и с умеренной экономической выгодой. Такой проект усилит интеграцию и улучшит координацию совместной деятельности национальных космических агентств в освоении космического пространства.

Сперва необходимо определить место строительства МЛИС. Опираясь на данные спутников NASA (LRO, LCROSS) определить наиболее оптимальный район строительства с учётом инженерных ограничений и научных требований. Следующим шагом станет формирование единого центра управления и поддержки МЛИС, для обеспечения бесперебойной связи со станцией независимо от положения Земли относительно видимой стороны Луны и координации действий между космическими агентствами.

В дальнейшем, необходимо начать формирование инфраструктуры МЛИС (размещение модулей, размещение источников электроэнергии, астрономической обсерватории и т.д.). Из-за того, что пилотируемый полёт на Луну неотъемлемо связан с большим количеством рисков, представляющих угрозу жизни и здоровью экипажа, строительство инфраструктуры лунной базы целесообразно начать с использованием робототехнических средств. Данные средства будут управляться непосредственно операторами на Земле находящимися в ЦУПе или космонавтами на станции, или, при необходимости, на окололунной орбите. На первом этапе осуществляется посадка автоматической посадочной станции с многофункциональными грузовыми тягачами на борту (например, вездеходы NASA ATHLETE) которые сформируют безопасный ландшафт зоны строительства (удаление неровностей), займутся бурением лунного грунта, для дальнейшей его переработки, а также транспортировкой и соединением модулей. Затем на лунную поверхность начнут прибывать приборный модуль с аккумуляторами и солнечными батареями для МЛИС. Робототехнические комплексы произведут установку солнечных батарей на площадке возле станции. После этого на поверхность сядет модуль переработки лунного грунта, основная функция которого будет заключаться в получении кислорода и водорода из реголита. Следующим этапом станет отправление жилого модуля рассчитанного на 3 человека экипажа станции, для тестирования систем. Снабжение станции опирается на местные ресурсы (добытые кислород и водород, полученную воду, топливо, растительную пищу) с небольшим количеством припасов с Земли, с целью повышения автономности станции. К тому же нужно доставить на поверхность транспортные средства для перемещения космонавтов. Потребуется оранжерея, для выращивания растений, лаборатория для проведения экспериментов и изучения образцов лунной породы. Жилые модули и оранжерею нужно обеспечить противорадиационными средствами, для того, чтобы на случай коронального выброса масс, направленного в сторону системы Земля-Луна, экипаж мог спрятаться от смертельно опасного потока заряженных частиц в укрытии. Последующим шагом может стать посадка первой лунной обсерватории, для проведения удалённых астрономических наблюдений с поверхности Луны. Научная целесообразность такой обсерватории заключается в отсутствии атмосферы, неограниченностью по времени, и отсутствием необходимости поддержания стабильного положения, в отличие от орбитальных телескопов. Функционирование обсерватории будет поддерживаться экипажем станции. Заключительным этапом строительства станет отправка космического корабля с экипажем и многоразовым лунным взлётно-посадочным модулем (ЛВПМ), который

обеспечит посадку экипажа с окололунной орбиты, а по завершению пребывания, обратное их возвращение на космический корабль.

По прилёту на окололунную орбиту, экипаж переходит в ЛВПМ, а командный модуль продолжит обращение вокруг Луны в беспилотном режиме до возвращения экспедиции. По прилунению экипажу необходимо осуществить заправку ЛВПМ компонентами топлива, полученного из модуля переработки. Длительность пребывания на станции – 2 недели (1 лунный день). Перед наступлением лунной ночи экипаж приступает к процедуре возвращения на Землю, а станция переходит на функционирование в режиме низкого энергопотребления (для оптимального расхода заряда аккумуляторов на протяжении всей лунной ночи).

## Сравнение расчетов гидравлических параметров системы подачи воды второго яру-са перспективного стартового комплекса с использованием справочных материалов и математической модели

Советников Я.Н.
Научный руководитель — Бут А.Б.
МАИ, Москва
Yroslavsovetnik@mail.ru

Россия является одним из лидеров по числу запусков ракет космического назначения в год. Каждый старт ракеты сопровождается акустическими нагрузками на приборные отсеки, полезную нагрузку или пилотируемый корабль.

Основным источниками акустических нагрузок при старте ракеты-носителя являются как сами свободные сверхзвуковые струи, так и области взаимодействия струй с преградами. В первую очередь вопрос решения задач по снижению акустических нагрузок, стоит для ракет тяжелого и перспективных ракет сверхтяжелого классов.

Для снижения шума на стартовых комплексах широко используются активные методы шумопоглощения. Шумопоглощение осуществляется подводом воды в область газовых струй двигательной установки ракеты-носителя на разных расстояниях от среза сопла. Эффективность таких систем зависит от выбора параметров системы подачи воды, таких как расход, скорость движения жидкости, форма факела распыла воды, который в свою очередь представляет собой сложную инженерную и научную задачу.

Для решения данных задач применяются ручные методы расчета и расчеты с помощью программного обеспечения (моделирования). Возникает вопрос соответствия полученных данных этими методами.

С этой целью для второго яруса подачи воды перспективного стартового комплекса проведен расчет и выполнено сравнение результатов ручного расчета и моделирования при помощи программного обеспечения Simulink в среде Matlab. По полученным результатам сделаны следующие выводы:

- определение параметров с помощью Simulink в среде Matlab выполняется за меньшее время чем при ручном расчете;
- при помощи модели возможно выводить результаты наглядно в виде графиков;
- построение модели выполняется с помощью стандартных блоков, которые не нужно составлять вручную;
- возможность внесение изменений в модель и возврат к исходной модели с сохранением параметров, не требует долгой продолжительности времени;
- при ручном расчете возможно учитывать все параметры трубопроводов при движении жидкости;
- значения параметров давления по Matlab выше на 6.21% от ручного расчета, что говорит о достаточной точности результатов модели;

- для подтверждения параметров при расчете и моделировании необходимо проведение гидравлических испытаний, по результатам которых можно судить о достоверности полученных данных.

Необходимо продолжить работу с Simulink в среде Matlab для определения возможных ошибок при моделировании и повышения точности.

## Использование воздушного винта как движителя в условиях Марса

Фатеев К.С.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Береговой В.Г.
МАИ, Обнинск
gladiatoreks@gmail.com

Марс — планета, путешествие к которой с Земли требует наименьших энергетических затрат, вследствие чего в обозримом будущем прогнозируются крупные разработки в области колонизации данной планеты. Помимо прочего, для обеспечения жизнедеятельности колонии необходимо решить проблему транспортировки людей и грузов на средние и длинные дистанции по поверхности Марса. Для этого необходимо разработать малогабаритное колесное транспортное средство, ближайшим аналогом которого может являться американский планетоход Lunar Rover.

В качестве пространства эксплуатации в данной работе взяты две наиболее оптимальные зоны для потенциальной колонизации: Равнина Эллада и Долины Маринер. Данные локации интересны своей глубиной относительно поверхности Марса - от 7 до 11 километров соответственно, что дает выигрыш в толщине атмосферы над ними. Атмосферное давление в нижней точке Равнины Эллада — 1240 Па (9 мм рт. ст.), что вдвое выше, чем на среднем уровне поверхности или равно земному на высоте свыше тридцати километров. Атмосфера состоит из углекислого газа (95 %) с примесями азота, аргона, кислорода и других газов.

Наличие на Марсе атмосферы позволяет предположить о возможности использования толкающего воздушного винта в качестве движителя для такого аппарата, то есть создание своего рода аэромобиля. Важной задачей является вывод оптимальных кинематических и геометрических характеристик винта, а также исследование возможности использования таких конструкторских решений, как щелевые или тандемные винты.

## Эволюция ракеты-носителя Р-7, как технической системы

Фёдорова Н.В.
Научный руководитель — Токарев А.С.
МАИ, Москва
nadyaiam@gmail.com

Будучи изначально двухступенчатой межконтинентальной баллистической ракетой, первой доставившей боеголовку на межконтинентальную дальность, Р-7 послужила прародительницей целого семейства легендарных ракет космического назначения, открывшего космическую эру человечества.

Как и любая другая техническая система, Семёрка проходит три главных этапа развития - зарождение, эволюцию и стагнацию. Смерть для технических систем не так важна, как для биологических, так как, вследствие эволюции среды, всегда может настать время «воскрешения» какой-либо технологии.

Зарождению семёрки предшествовала разработка от 13 февраля 1953 года эскизного проекта двухступенчатой баллистической ракеты дальнего действия с отделяющейся головной частью, массой 3000 кг и дальностью 8000 км. А 3 октября того же года скачок в развитии подсистемы (успешные испытания первого советского термоядерного заряда в

Семипалатинске), потребовал от основной системы увеличения массы головной части с 3000 до 5500 кг при сохранении дальности полета, в связи с чем потребовалась значительная переработка проекта. Так началась история Р-7.

Удачность и большая надёжность конструкции открыли большие перспективы для модернизации, эволюции системы, и уже в 1958 началась разработка модификации Р-7А. Ключевым моментом в является создание ракеты-носителя «Спутник», что знаменует принципиальное изменение в направлении развития системы. Так эволюция встала на путь совершенствования ракет космического назначения. От «Спутника» до «Союза» происходит значительное улучшение различных показателей -увеличение массы полезного груза, повышение надёжности, совершенствование процессов производства. Это развитие неразрывно связано с развитием среды - формируется инфраструктура, подготавливаются кадры, растут космические потребности. Происходит увеличение степени идеальности системы.

Создание первых ракет-носителей стало толчком для появления всей космической отрасли в нашей стране. Таким образом, система перешла в надсистему, начав функционировать и развиваться, в качестве её составной части.

Стагнация в космической отрасли обусловлена множеством факторов - отсутствие частных инвестиций, увеличение страховых сборов, неудачные пуски ведут к сдаче российских позиций в пусковом сегменте. При этом, техническая система, созданная на базе Р-7, а именно «Союз» с разгонным блоком «Фрегат», продолжает быть очень востребованной в мире космических полётов, выходящим за пределы надсистемы. На данный момент это один из наших главных космических экспортных товаров.

## Сравнительный анализ и выбор рациональной компоновки солнечных батарей для неориентируемых космических аппаратов

Феофанов А.С.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Матвеев Ю.А.
МАИ, Москва
mr.feofan@yandex.ru

Одна из важнейших систем космического аппарата (КА) – это система электроснабжения (СЭС). В целом СЭС КА состоит из трех основных элементов: первичного и вторичного источников энергии, а также сети, отвечающей за регулирование и распределение тока.

Первичный источник преобразует энергию, получаемую извне, в электрическую энергию. Вторичный источник требуется для накопления и сохранения энергии, полученной от первичного источника, а также для обеспечения систем КА электрической энергией.

Самый распространенный внешний источник энергии на данный момент – это солнечное излучение, поэтому большинство КА включают в состав СЭС солнечные батареи (СБ). Однако СБ применимы только в определенных случаях, когда КА находится между орбитами Венеры и Марса. Это объясняется тем, что СБ крайне чувствительны к температуре и к плотности потока солнечного излучения. Если говорить про зону, которая ближе к Солнцу, то при нагреве элементов фотоэлектрических преобразователей ухудшаются их удельные характеристики, соответственно, падает количество вырабатываемой энергии от солнечных панелей. Что касается дальней зоны, то дальше орбиты Марса уже недостаточно солнечного излучения для обеспечения нормальной выработки электроэнергии от СБ.

В зависимости от того, какие требования предъявляются к системе ориентации КА (строгие или нестрогие), зависит и компоновка СБ на КА. Если требования к ориентации строгие, то КА будет находиться в одном и том же положении в пространстве, а значит,

панели СБ будут располагаться неподвижно относительно Солнца, либо будут вращаться в одной плоскости, при которой солнечный свет будет всегда ортогонален поверхности панелей СБ, либо панели СБ будут находиться на приводах, которые будут поворачивать панели вслед за положением Солнца относительно КА.

Если требования к ориентации нестрогие или КА летит в режиме закрутки, то разумнее всего располагать панели СБ прямо на корпусе КА. Соответственно, возникает вопрос, какое оптимальное количество граней необходимо иметь КА, на которых будут располагаться СБ?

В связи с этим в данной работе произведен расчет зависимости числа граней корпуса КА от эффективности использования СБ. Так как число граней корпуса может варьироваться от 3 до бесконечности (вариант окружности), то для каждого случая был произведен расчет, при котором сравнивались два варианта освещенности граней:

1 – лучи солнечного света ортогональны одной из граней;

2 – лучи параллельны радиус-вектору, проходящему через центр описанной окружности многогранника и точку, соединяющую две ближайшие грани.

Далее производился расчет эффективности использования панели СБ каждой грани с точки зрения выработки энергии, зависящей от угла падения лучей солнечного света. В конце расчетов сравнивались два случая освещенности, описанных выше, и выбирался худший вариант (чтобы обеспечить штатное функционирование КА при наихудших условиях освещенности).

В результате расчетов прослеживается определенная закономерность – зависимость относительной суммарной площади СБ от числа граней корпуса КА стремится к числу 4, это значит, что суммарная масса и, соответственно, площадь панелей СБ будет в 4 раза больше, чем при использовании лишь 1 панели СБ с теми же требованиями по выработке электроэнергии.

Исследовав полученные расчеты, можно сделать вывод, что оптимальное число граней КА для расположения на них СБ составляет $n=i\cdot 4$ (при $i=1\ldots\infty$), так как для них относительное превышение суммарной массы СБ, относительно единичной панели СБ с теми же энергетическими характеристиками, составляет минимальное значение, а именно в 4 раза. Либо больше 30, так как для этих вариантов числа граней превышение суммарной массы СБ составляет незначительное значение по сравнению с вышеперечисленными вариантами. То есть суммарная масса всех панелей СБ будет в 4 раза тяжелее, чем одна панель СБ. При этом, количество вырабатываемой энергии будет одинаковым, что для многогранной конструкции, что для одинарной панели СБ.

А худшими, с точки зрения энерго-массовых характеристик, являются варианты с числом граней 3 и 6, и 5 и 10, так как для них относительная суммарная масса СБ превышена в 4,5 и 4,2 раза соответственно относительно массы единичной панели СБ.

То есть конструкции, состоящие из 3 и 6 граней, будут на 12,5% тяжелее, чем конструкции, состоящие из $n=i\cdot 4$ и больше 30 граней, а конструкции, состоящие из 5 и 10 граней, будут на 4% тяжелее.

## Универсальная шагающая машина

Шестернин Д.С.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Береговой В.Г.
МАИ
dimanshesternin@yandex.ru

Планетоход — это аппарат, предназначенный для передвижения по поверхности другой планеты. Некоторые планетоходы были сконструированы для передвижения членов экипажа космической экспедиции, другие были нетранспортными исследовательскими аппаратами — дистанционно управляемыми роботами.

Шагоходы, или шагающие машины — разнообразные машины, передвигающиеся при помощи сгибающихся или вращающихся на шарнире опорных конструкций («ног»), методом их синхронизированной поступательной перестановки (внешне напоминающей шаг человека или животного, т. е. машины на «шагающем» ходу) с гидравлическими, механическими, электрическими и другими приводами указанных конструкций.

Планетоходы доставляются на поверхность исследуемого небесного тела посадочными модулями, которые могут являться как самостоятельными космическими судами, так и отделяемыми спускаемыми аппаратами.

В настоящее время считается, что Солнечная система довольно хорошо изучена, в отличии от дальнего космоса, но и здесь есть не мало тайн. Так же до сих пор еще не существуют разделы физики, позволяющие описать процессы, происходящие сразу после Большого взрыва. Ничего нельзя сказать о породивших его причинах, сохраняется полная неясность относительно физической природы темной материи. Возможно, изучение планет Солнечной системы даст нам ответы на многие вопросы.

Так же, не маловажной проблемой на Земле является ее перенаселение. Это проявляется в социально-экономических противоречиях и конфликтах: падение уровня жизни большинства населения, высокий уровень безработицы, голод, войны. И одним из выходов из данного положения является колонизация другой планеты, в ходе которой планетоходы будут использоваться в огромных масштабах.

Актуальность настоящего исследования – это стремление расширить возможности человечества как в рамках Солнечной системы, так и за ее пределами.

## Модернизация Лунного посадочного корабля национальной корейской космической программы

Юн Сон Ук, Пак Сонги
Научный руководитель — Фирсюк С.О.
МАИ, Москва; Сеул, Республика Корея
wook4573@naver.com

В докладе рассматривается проблема расположения баков горючего и окислителя лунной АМС выполненной с помощью национальной корейской Лунной программы.

На основании успешного запуска KSLV-1 в рамках технического сотрудничества с Россией в 2013 году, Южная Корея стремится к усовершенствованию корейской ракеты KSLV-2 до 2020 года. Корейская ракета KSLV-2 состоит из трех ступеней, которые могут использоваться для выведения 1,5 тонны ИСЗ на солнечно-синхронную орбиту(наклонение около 98 градусов) высотой 700 км. Если ракета-носитель будет успешно разработана, Лунная программа будет реализована в 2030 году. Лунная программа предполагает самостоятельный запуск Лунного посадочного корабля с помощью корейской ракеты KSLV-2. В данном случае, существующая трехступенчатая ракета-носитель не имеет необходимой энергетики, чтобы обеспечить перелет от Земли до Луны. Для TLI (Trans-Lunar Injection) маневра разгонного блока, который вращается на низкой опорной орбите около 300 км, нужна характеристическая скорость около 3106 м/с. Для осуществления LOI (Lunar Orbit Injection) маневра Лунного посадочного корабля, нужна характеристическая скорость около 813 м/с.

Лунный посадочный корабль использует свою собственный двухкомпонентный ЖРД для входа на лунную орбиту около 100 км посредством LOI-маневра. Затем Лунный посадочный корабль использует свой собственный двигатель для достижения высоты около 15км через DOI (descent orbit insertion) маневр, и на конечной стадии осуществляет мягкую посадку на поверхность Луны. Двигательная установка Лунного посадочного корабля оснащается двигателем тягой 420Н для коррекции орбиты, который может поддерживать

относительно высокий удельный импульс для снижения массы при входе на орбиту Луны и торможении при спуске, а также двигателем тягой 200Н для управления посадкой, который будет использоваться для мягкой посадки. В настоящее время в расположении баков топлива и окислителя предполагается использовать 2 сферических бака, расположенных один над другим. Подобная компоновка упрощает удержание центра масс на центральной оси, но требует больше массы для крепления баков, чем если бы баки были расположены горизонтально. Кроме того, окончательно при вертикальном расположении баков, он подвергается сильной осевой нагрузке, а устойчивость Лунного посадочного корабля ухудшается при посадке на Луну.

В предлагаемом исследовании проводится анализ модификации расположения и формы бака с помощью приведенного расчета для увеличения устойчивости при посадке на Луну и подтверждения изменения массы Лунного посадочного корабля. Существующие вертикально расположенные баки будут размещены на одной плоскости для распределения нагрузки, а также количество баков будет изменено.

Список литературы:

1. Констатинов М.С., Каменков Е.Ф., Перелыгин Б.П., Безвербый В.К. Механика космического полета: учеб. пособие для вузов М: Машиностроение, 1989. 406 с.

2. Сердюк В.К. Проектирование средств выведения космических аппаратов: учеб. пособие для вузов М: Машиностроение, 2009. 504с.

3. Гущин В. Н., Панкратов Б. М., Родионов А. Д. Основы устройства и конструирования космических аппаратов: учеб. пособие для вузов М: Машиностроение, 1992. 256 с.

4. Хохулин В.С., Чумаков В.А., Проектирование космических разгонных блоков с ЖРД: учеб. пособие для курсового и дипломного проектирования М: Изд-во МАИ, 2000. 72 с.

5. Dong-Young Rew, Jae-Ik Park, Woosup Lee, Jinho Jo, Kwang-Jae Son, Jin Joo Kim System concept for the Robotic Lunar Landing Mission: KSAS 2017 Spring Conference. Samcheok, Republic of Korea: 2017. pp. 354-355.

6. Jae-Ik Park, Dong-Young Rew Study on Delta-V and Fuel Mass Analysis of Korean Lunar Lander Mission: KSAS 2017 Spring Conference. Samcheok, Republic of Korea: 2017. pp. 356-357.

# Секция №5.5 Системы жизнеобеспечения и экологическая безопасность космической деятельности

## Загрязнение космоса космическим мусором и его решение устранения

Корепанова А.А.
Научный руководитель — доцент, Галкина Е.Е.
МАИ, Москва
alina.andreevna.der@mail.ru

Современное человечество активно осваивает космос. Число космических полетов неуклонно растет, но это ведет к возникновению ряда проблем связанных с негативным воздействием на экологию Земли. На окружающую природную среду воздействуют газообразные, жидкие и твердые загрязнители. Экологические последствия во многом зависят от природно-географических условий, в которых расположен космодром. Одной из серьезных проблем, связанных с освоением космического пространства, является загрязнение космоса, так называемым космическим мусором. К категории космического мусора можно отнести все закончившие свою активную работу объекты, находящиеся на околоземных орбитах. Объектов диаметром более 10 см насчитывается около 8 тыс единиц, объектов диаметром менее 19 см - около 100 тыс единиц, мелких объектов – миллионы. Наибольшая концентрация наблюдается на высотах 500 - 2 000 км, 20 000 км и 36 000 км. Сложившаяся ситуация может затруднить полеты на низких околоземных орбитах так как в результате взаимных столкновений количество объектов продолжает увеличиваться. В связи с этим возникает опасность столкновения летательных аппаратов с частицами мусора. Решение этой проблемы возможно следующими методами.

Экономически наиболее оправданы методы, применяемые на этапе проектирования и строительства летательных аппаратов, позволяющие внести изменение в конструкцию. В том числе:

- использование защитных экранов в конструкциях летательных аппаратов;
- применение более твердых сплавов в качестве верхнего слоя обшивки;
- применение специальных методов, направленных на снижение вероятности взрыва при столкновении космических аппаратов закончивших срок службы с действующими космическими аппаратами или объектами космического мусора.

Выведение летательных аппаратов закончивших срок службы на соседние орбиты с целью избежания столкновений (пассивации).

Составления атласов объектов космического мусора.

Необходимо использовать методы математического моделирования для прогнозирования вероятности столкновений объектов космического мусора с вновь запускаемыми космическими аппаратами и определять безопасные стартовые окна. При проведении расчетов траекторий движения объектов, относимых к космическому мусору, необходимо учитывать вероятность столкновений в результате которых число объектов может увеличиться, массу объектов, их плотность, постоянное увеличение числа объектов, находящихся на околоземных орбитах.

Одним из путей снижения образования космического мусора является повышение качества и надежности работы изделий. Для этого необходимо установить контроль за применяемыми материалами, технологиями производства и запуска космических аппаратов.

В Федеральной космической программе России планируется создание космических аппаратов – уборщиков мусора которые будут переводить космические аппараты на орбиты захоронения

# Исследование характеристик визуального восприятия информации с фрактальной организацией

Абрашкин Д.А.
Научный руководитель — профессор, Найченко М.В.
МАИ, Москва
denisabrashkin@yandex.ru

Поведение человека регламентируется во многом воспринимаемой информацией. Зрительная система человека обладает свойством стереоскопического восприятия этой информации. Большинство же информационных моделей, создаваемых человеком, имеют два измерения: фотографии, произведения живописи, кинофильмы, различные информационные табло и т. д. Это обедняет наше восприятие, ведь человек до 85% информации о внешнем мире получает через функцию зрения. Современный уровень развития науки и техники позволяет перейти на более высокий уровень виртуального моделирования.

Актуальность темы данного исследования определяется потребностями современной науки в новом подходе к исследованию особенностей зрительного восприятия визуальной информации, а именно:

- возникновением исследований в области синергетики и теории фракталов, обуславливающих необходимость использования новейших данных из этой области в исследовательском и учебном процессе зрительного восприятия визуальной информации;
- потребностью педагогического процесса в адаптации современных компьютерных технологий, а также создании научно обоснованной теории фрактальной гармонизации.

В результате проведенных исследований получены экспериментальные данные, свидетельствующие о том, что фрактальность объектов существенным образом влияет на эффективность их распознавания. Фрактальная организация естественных природных объектов сложилась в процессе эволюции их развития. Именно понятие фрактала объединяет обширный класс природных объектов неправильной формы и высокого уровня сложности. Распознавание их — сложный психический процесс, в котором определяющая роль отводится врожденным и приобретенным в процессе накопления жизненного опыта образам. Во многих случаях поведение живого организма становится объяснимым, если принять концепцию, что эти образы являются своего рода фракталами. В связи с этим, актуальным становится вопрос - на каком этапе восприятия информации влияние фрактальной модальности зрительного стимула проявляется более всего.

В процессе дальнейших исследований намечено проведение экспериментов с применением фрактального анализа биоритмов организма для выделения и визуальной оценки степени гармонизации биоритмов различных органов и систем организма, имеющих фракталоподобную структуру с целью выявления их влияния на характеристики визуального восприятия информации.

Фрактальный анализ позволяет выявить подобие в закономерностях динамических параметров ритмов, характеризующих физиологические процессы в организме человека и процесс распознавания образов. В процессе анализа электрокардиограммы выделяются ритмы, которые имеют фракталоподобную структуру, проявляющуюся в виде универсальных реакций на внешнее восприятие информации. Степень согласованности этих ритмов может определять качество восприятия информации в заданный момент времени.

# Неблагоприятное воздействие на окружающую среду при эксплуатации самолётов гражданской авиации

Авдеева Н.А.
Научный руководитель — доцент, к.э.н. Метечко Л.Б.
МАИ, Москва
natalimayhem@gmail.com

В настоящие дни авиация создает неблагоприятное воздействие на окружающую среду. Научно-технический прогресс не стоит на месте и в значительной степени влияет на внешнюю форму летательного аппарата, рост грузоподъемности, скорости, манёвренности и создания комфортных условий для пассажиров и экипажа. Но без специальных экологических мероприятий цена прогресса может быть слишком высокой.

Одним из главных источников неблагоприятных воздействий на близлежащие территории являются заводы-изготовители. Основными источниками промышленных отходов при этом являются авиаремонтные заводы и склады горюче-смазочных материалов, специальный автотранспорт, ремонтные базы, резервуары хранения авиационного топлива.

Неблагоприятное воздействие предприятий основывается на ряде факторов. К подобным факторам относятся: шум, выбросы загрязняющих веществ, электромагнитные излучения, звуковой удар. Непосредственно к загрязняющим веществам относят эмиссию углекислого газа, оксидов азота, водяных паров, несгоревших углеводородов: бензол, пропан, этан, ацетилен, метан.

Шумы делятся на два вида: шумы, создаваемые турбулентными потоками, и шумы двигателя, системы летательного аппарата. Аэродинамический шум возникает из воздуха вокруг фюзеляжа самолёта как при увеличении скорости самолёта, так и на низких скоростях. Шумы двигателя напрямую зависит от типа двигателя и производятся практически во всех его элементах: вентиляторах, компрессоре, камере сгорания, турбине и реактивном сопле. Источником шума также являются вспомогательные системы, как вспомогательная силовая установка.

При круглосуточной интенсивной эксплуатации аэропортов уровни звука на жилой территории достигают в дневное время 80 дБА и в ночное время - 78 дБА, максимальные уровни колеблются от 92 до 108 дБА.

Гражданская авиация, как наиболее массовое направление авиастроения, представляет собой сложную технико-экономическую систему, объединяющую различные сферы хозяйственной деятельности человека, от обеспечивающей природными компонентами до сфер, обеспечивающих конкурентоспособность на внутренних и международных рынках и отвечающих за комфорт перевозимых пассажиров, а также работников, занятых на авиапредприятиях.

Проблема защиты людей и природной среды от вредного воздействия авиационной техники является актуальной и сложной на всех стадиях жизненного цикла летательного аппарата. Мероприятия по ее решению должны идти с учетом технических, финансовых и организационных возможностей. Уменьшение неблагоприятного воздействия самолетов на окружающую среду является важной научно-технической проблемой.

Наиболее эффективным подходом подход к решению описанной выше проблемы является комплексный подход, который позволяет достичь значительного сокращения неблагоприятных воздействий на окружающую среду с меньшими затратами. Такой подход предусматривает уменьшение вредных воздействий в источнике их возникновения, внедрение строительно-планировочных мероприятий, ограничение вредных воздействий вблизи аэропортов и контроль за их соблюдением.

Список литературы:

1. Квитка В.Е. и др. Гражданская авиация и охрана окружающей среды. – Киев: Вища школа, 1984.
2. ГОСТ 12.I.024-81. Шум. Определение шумовых характеристик источников шума в заглушённой камере. Точный метод.
3. ГОСТ 17228-78. Самолеты пассажирские и транспортные. Допустимые уровни шума, создаваемого на местности.
4. Ашфорд Н., Райт П.Х. Проектирование аэропортов / Пер. с англ. — М.: Транспорт, 1988.
5. Цыплухина Ю.В., Манченко Е.В. Воздействие авиационного шума на здоровье населения. Статья eLIBRARY.RU
6. Отмахова Т. В. Экологические проблемы авиационных частей военно-воздушных сил и пути их решения.
7. Григорьев В. А., Кузнецов С. П., Гишваров А. С. Испытания авиационных двигателей. Университетская библиотека.
8. Ильин В.Е. Левин М.А. Бомбардировщики. Том I. Библиотека Либрусек.

## Вопросы обеспечения водой космонавтов при длительной работе на космических станциях

Алпаткина Ю.О.
Научный руководитель — доцент, к.э.н. Метечко Л.Б.
МАИ, Москва
juliaalp@mail.ru

Вода – это жизнь. Этой мысли тысячи лет, а она до сих пор не утратила своей актуальности. С наступлением космической эры, значение воды лишь возросло, так как от воды в космосе зависит буквально все, начиная от работы самой космической станции и заканчивая выработкой кислорода.

Регенерация воды – это повторное получение воды. Отсюда нужно сделать самый главный вывод, что первоначально вода на МКС доставляется с Земли. Невозможно регенерировать воду, если изначально ее не доставить с Земли. Сам процесс регенерации снижает расходы на космические полеты, и делает систему МКС менее зависимой от наземных служб.

Ключевым моментом в регенерации является очистка воды. Современные методы очистки позволяют в результате получить чистую питьевую воду, которая по своим качествам даже превосходит питьевую воду во многих уголках Земли.

Регенерация воды в космосе тесно связана с регенерацией кислорода. Процесс производства максимально прост – специальные приборы конденсируют влагу из воздуха, а затем путем электролиза из этой воды производят кислород. Электролиз - пропускание тока через воду, является хорошо отработанной схемой, которая надежно обеспечивает космонавтов кислородом.

Ученые бьются над решением задачи – 100% замкнутый цикл для полного обеспечения космонавтов водой и кислородом. Одна из самых перспективных разработок – получение воды из углекислого газа. Этот газ является продуктом дыхания человека, и в настоящее время этот «продукт» жизнедеятельности космонавтов практически не используется.

## Влияние космического мусора на атмосферу Земли

Баско А.С.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Родченко В.В.
МАИ, Москва
anastasiya-basko98@yandex.ru

Влияние космического мусора на атмосферу Земли

Освоение космоса началось в XX веке. Наибольший вклад в этой сфере сделал К.Э. Циолковский, выведя формулу идеальной скорости полета ЛА.

До начала космических запусков и некоторое время после ученые не думали о том, что освоение космоса имеет влияние на экологию. Оказалось имеет, при том не только на экологию, но и на безопасность самих КА, находящихся на орбите.

Под космическим мусором понимают искусственные объекты, их фрагменты, которые не пригодны к вторичному использованию. По данным NASA 95% всех объектов космоса являются мусором. В последние 30 лет освоения космоса наблюдается только увеличение количества следов пребывания человека в космосе. На данный момент имеется 80.000 каталогизированных объектов с поперечным размером более 0,1 метра, около 300.000 объектов с поперечным размером, превышающим 0,01 м, и несчетное количество мелких фрагментов. Данные цифры характеризуют глобальность проблемы космического мусора.

По приблизительным расчетам экологов при сохранении темпов освоения космоса, ожидается двукратное увеличение объема мусора к концу XXII века. Что даст возможность мусору размножаться в геометрической прогрессии, за счет столкновения фрагментов между собой на высоких скоростях.

Время жизни фрагментов мусора в верхних слоях атмосферы примерно 100 лет, за это время мусор запасает и передает энергию атмосфере очень медленно, в несколько десятков раз медленнее, чем передается энергия солнечного света. Но так как фрагменты мусора сталкиваются и дробятся на более мелкие, то время их жизни уменьшается, а следовательно энергию атмосфере они передают гораздо быстрее. Из-за такой переда энергии меняются естественные свойства атмосферы.

Фрагменты мусора разрушаются под действием ультрафиолетового излучения, атомарного кислорода. Окисление мусора и разложение его ультрафиолетовым излучением приводит к изменению химического состава атмосферы.

Для получения полной информации о тенденциях изменения химического состава атмосферы необходимо проводить регулярные и точные исследования.

Библиографический список

1. http://zmdosie.ru/chitalnyj-zal-zm/rekomenduem/819-po.. М.В.Черкасова «Социально-экологические последствия ракетно-космической деятельности»// Газета «Зеленый мир».

2. http://www.medline.ru/public/art/tom10/art4.html Статья доктора медицинских наук Мешков Н.А. «Методические основы оценки влияния последствий ракетно-космической деятельности на здоровье населения, проживающего вблизи районов падения отделяющихся частей ракет-носителей».

## Энергосберегающая система кондиционирования воздуха

Бурлак Е.П.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Калпина Н.Ю.
Московский политехнический университет, Москва
jenea-burlak@mail.ru

Климат России с чередующимися теплым и холодным периодами обусловливает соответствующие режимы работы вентиляции, охлаждения и отопления производственных

помещений. При этом такие комплексные современные системы кондиционирования воздуха (СКВ) должны отвечать следующим требованиям [1]:

- обеспечение круглогодового функционирования по энергосберегающей технологии;
- применение в системе простого в конструктивном отношении и надежного в эксплуатации оборудования;
- снижение вредных выбросов в окружающую воздушную среду.

СКВ формируются на основе подсистем приточной и вытяжной вентиляции, каждая из которых оборудована вентилятором, аппаратом для тепловлажностной обработки воздуха и устройством для его очистки от вредных примесей на входе в систему и на выходе из нее.

При этом для снижения температуры воздуха в теплый период года используются блоки адиабатного увлажнения, в которых осуществляется его водоиспарительное охлаждение, что отвечает требованиям как с точки зрения энергосбережения, так и с позиции относительной простоты конструкции системы при достаточно высокой ее надежности.

Для предварительного подогрева приточного наружного воздуха за счет теплоты вытяжного потока применяют пластинчатые утилизаторы. Однако они надежно функционируют при температуре наружного воздуха не ниже минус 50С, поскольку дальше начинается их обмерзание со стороны вытяжного потока, сопровождающееся забиванием каналов инеем с последующим выходом агрегата из строя. Не защищает от этого явления выполнение утилизаторов в виде тепловых труб, в которых для переноса теплоты от одного потока к другому они частично заполнены фреоном. Поэтому в обоих случаях защита утилизаторов от полного обмерзания осуществляется с помощью специального предподогревателя- оттаивателя снеговой шубы, что обусловливает периодичность работы системы в целом. Это неприемлемо для современных СКВ.

В условиях климата России использовать технологическую схему с применением промежуточного теплоносителя – антифриза. Это направление принимается к реализации, однако вопрос заключается в выборе рационального аппарата для его воплощения.

В связи с этим рассмотрена технологическая схема обработки воздуха в системе его круглогодового кондиционирования, содержащая подсистемы приточной и вытяжной вентиляции, оборудованные аппаратом с подвижной шаровой орошаемой насадкой. Энергосбережение в системе обеспечивается за счет использования потенциала воздуха помещения в вытяжном насадочном аппарате, откуда обработанный теплоноситель (вода в теплый период и антифриз в холодное время года) поступает в теплообменник –рекуператор на входе наружного воздуха в приточную подсистему. При этом в теплый период в системе осуществляется прогрессивный процесс косвенно-прямого водоиспарительного охлаждения приточного воздуха, а в холодное время года, благодаря использованию антифриза, исключается обмерзание рекуператора, что обеспечивает надежность ее функционирования в зимних условиях климата России.

Список литературы:

1. Михайлов В.А., Сотникова Е.В. Энергосберегающая цеховая система защиты воздушной среды участка электросварочных работ. Безопасность жизнедеятельности. 2015. №4 (172). С.3 – 10.

2. Михайлов В.А., Сотникова Е.В., Калпина Н.Ю. Энергосберегающая система круглогодового кондиционирования воздуха в производственном помещении. Безопасность жизнедеятельности. 2016 №12(192). С.14-19

## Оценка экологической безопасности получения поливинилхлорида

Варданян Е.С.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Горбачев С.И.
МАИ, Москва
frau94@inbox.ru

В современном мире при создании изделий из полимерных материалов (ПМ) решают две основные задачи. Первая – правильный выбор самого ПМ, вторая - максимальная сохранность свойств ПМ на всех стадиях его жизненного цикла. Связаны эти процессы с оценкой жизненного цикла материала, основанного на серии ISO-стандартов, и включающего в себя выявление потенциальных воздействий на окружающую среду со стороны продукционной системы в течение всего жизненного цикла продукции.

В силу большого числа видов разработанных и промышленно применяемых полимерных материалов, рассматривается только один из представителей данных групп полимерных материалов поливинилхлорид (ПВХ), также известного под аббревиатурой PVC.

Данный полимер имеет массу преимуществ. У него очень высокая химическая и коррозийная стойкость, а также он имеет высокую механическую прочность на растяжение с высокой ударной вязкостью. Он биологически инертен и физиологически безвреден.

Несмотря на положительные стороны, данный полимер вызывает опасения с экологической точки зрения.

Согласно оценке индекса экологической безопасности материалов (ИЭБМ), поливинилхлорид обладает наибольшей экологической опасностью, в связи с тем, что в технологии производства используется винилхлорид и хлорид ртути, которые относятся к первому классу опасности. Также он обладает высокой токсичностью продуктов термического разложения полимера.

При анализе ИЭБМ были выявлены наиболее экологически опасные сырьевые компоненты и факторы технологического процесса производства поливинилхлорида. Итак, из сырья это хлор, дихлорэтан, соляная кислота и ВХМ (что связано с их высокой токсичностью), а на стадии полимеризации  только ВХМ.

ИЭБМ поливинилхлорида (Ки) = 20,62, что значительно превышает показания других массово производимых полимеров.

Например, согласно исследованиям, индекс экологической безопасности полиэтилена (ПЭ) = 5,8; полиэтилентерефталат (ПЭТ) = 3,76; полипропилен (ПП) = 5,25.

Анализируя полученные данные, можно говорить о низкой опасности вышеизложенных полимеров на окружающую среду и здоровья человека.

Приходим к заключению, что экологические риски, связанные с технологией производства ПВХ превосходят на порядок аналогичные риски для ПЭТ, ПЭ и ПП. А потенциальная химическая опасность самого ПВХ выше, по сравнению с другими материалами.

## Применение авиационной техники в условиях паводкового наводнения

Васькова Е.А., Сергеев Н.М.
Научный руководитель — профессор, д.г.н Шелутко В.А.
РГГМУ, Санкт-Петербург
esenya95@mail.ru

Частота и масштаб наводнений, в частности паводковых, увеличились, являясь следствием изменения климата, при котором повышается уровень мирового океана и соответственно увеличивается общий объем воды в круговороте воды в природе. Это приводит к обилию осадков и возникновению наводнений на реках с питанием осадками.

В условиях тенденции климата к изменениям с целью предсказания и разработки возможных мероприятий по смягчению наносимого ущерба от той или иной чрезвычайной ситуации природного характера возможно применение следующих методов: экспертные оценки, различные программные обеспечения (к примеру, Геоинформационные системы), прогнозы на основе математической статистики, методы аналогов, нейронные сети, построения матриц. Но каждая методика подвержена вероятной ошибки, которая создаст неблагоприятный эффект при защите территории в условиях чрезвычайной ситуации, поэтому необходима разработка мероприятий, при которых необходимо оперативное взаимодействие служб. Такие мероприятия осуществляются силами Единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (РСЧС).

В условиях паводкового наводнения возможно применение авиационной техники в следующих целях:

1. мониторинг территории и оперативная передача в РСЧС о нарастающем уровне воды,
2. доставка быстровозводимых дамб на территории с нарастающем уровнем воды с целью защиты территории и смягчения последствий от разрушающей стихии,
3. оперативное пополнение сил спасения на территориях подверженных вероятному затоплению,
4. оперативная эвакуация населения.

В условиях паводкового наводнения представляется возможным применение авиационной техники с двигателями на водородном топливе. Таким образом, будет происходить расход излишков воды на получение энергии, и в тоже время это позволит оперативно и с большим объемом задействовать средства и силы спасения при прохождении природной стихии. А также меньший объем излишнего диоксида углерода и прочих поллютантов станет частью окружающей среды.

Помимо использования двигателя на водородном топливе с целью защиты окружающей среды, необходим учет вероятного выпадения обильных осадков, и соответственно применение спектр применения конкретной авиационной техники сужается и ставит в приоритет использование гидросамолетов.

## Рост численности населения - надуманная проблема или реальная опасность?

Вахрушева Л.С.
Научный руководитель — доцент, к.э.н. Галкина Е.Е.
МАИ, Москва
karusik199747@gmail.com

Рост численности населения - надуманная проблема или реальная опасность?

На протяжение последних десятилетий человечество озабочено загрязнением окружающей среды. Часть специалистов придерживается теории, что главной причиной ухудшения экологической ситуации является рост народонаселения. В двадцатом столетии численность населения Земли возросла в 4 раза - с 1,6 млрд. до 6,1 млрд. чел. Рост населения, конечно, приводит к росту потребностей общества, а рост потребностей, в свою очередь, к ряду проблем: истощению природных и земельных ресурсов, загрязнению окружающей среды, нехватке пищевых ресурсов и т.д. Человечество с годами становится всё требовательнее: ему необходимо все больше воды, природных ресурсов, огромное количество автомобилей, все больше заводов. Все это негативно влияют на окружающую природную среду.

Кроме того, люди, привыкшие к комфорту, перестали экономить ресурсы. Ограниченность водных ресурсов, со временем может положить предел промышленному развитию. В настоящее время на планете используются 54% доступного годового объема пресной воды, две третьи этого количества идет на нужды сельского хозяйства. К 2025 г.

только по причине прироста населения вышеобозначенный показатель достигнет 70%. Во многих странах развивающихся странах темпы прироста населения в последние годы обгоняют темпы производства продовольствия. С 1985 по 1995 г. объемы производства продуктов питания отставали от демографического роста в 64 из 105 обследованных развивающихся стран, причем наихудшее положение наблюдалось в Африке.

Деградация окружающей среды, рост численности населения, слишком большая нагрузка на сельское хозяйство и неудовлетворительное распределение продовольствия в международном масштабе порождают вопрос: будет ли достаточно продовольствия в будущем?

Еще в 1798 году Томас Мальтус выдвинул теорию о том, что рождаемость возрастает в геометрической прогрессии, в то время как обеспечение продовольствием растёт только в арифметической прогрессии. По его теории земля может прокормить не более 10 млрд. человек. В связи с этим для развивающихся стран сегодня предполагается программа ограничения роста населения, в то время как в странах Европы на правительственном уровне проводят политику стимулирования рождаемости. Таким образом, можно говорить о двойных стандартах и делении населения Земли на людей 1-го и 2-го сорта. В 2015 году Генеральной Ассамблеей ООН были определены основные направления международного сотрудничества в целях устойчивого развития общества на период до 2030 года. В центре внимания, в соответствии с целями – человек, его жизнь, образование, условия проживания.

Существуют иные пути снижения антропогенного воздействия на окружающую среду.

1) организационно-управленческие рычаги:

- применение принципов устойчивого развития при планировании производства.
- экологически ориентированное проектирование продукции
- применение технологий замкнутого производственного цикла, вторичного использования отходов
- внедрение в практику работы предприятия стандартов разработанных Международной организацией стандартизации (ISO): на системы экологического менеджмента (ISO 14001:2015), на системы энергоменеджмента (ISO 50001:2007), на системы менеджмента социальной ответственности бизнеса (ISO 26001:2010), на системы менеджмента качества (ISO 9001:2015)

2) строительство энергоэффективных зданий, позволяющих экономить энергию и природные ресурсы.

3) В Австралии, Европе и Северной Америке имеются большие избытки продовольствия для экспорта и потенциал для расширения производства продовольствия. Еще очень мало задействованы пищевые ресурсы Моря.

Применение перечисленных подходов позволит решить проблему загрязнения окружающей среды производимое промышленными предприятиями, повысить качество продукции уменьшить количество отходов, экономить природные ресурсы и обеспечить растущее население Земли необходимым продовольствием.

## Применение ионных жидкостей в системе концентрирования и переработки диоксида углерода

Ведищев А.С., Еремина Е.К.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Курмазенко Э.А.
МАИ, Москва
vedishchev.andrey@gmail.com

Проблема создания и поддержания условий, обеспечивающих жизнедеятельность экипажей межпланетных пилотируемых аппаратов (МПА) в длительных космических миссиях, является одной из важнейших научно-технических проблем, связанных с

освоением человеком дальнего космоса, решение которой определяет дальнейшее развитие пилотируемой космонавтики.

Длительные межпланетные пилотируемые миссии выдвигают совершенно иные требования к интегрированным системам жизнеобеспечения (ИСЖО) на борту. Созданные и эксплуатируемые на МКС системы жизнеобеспечения по своим массоэнергетическим характеристикам и показателям надежности не удовлетворяют требованиям, предъявляемым к системам МПА. Поэтому возникла проблема создания нового поколения ИСЖО на основе новых технологий и полифункциональности.

Одной из основных функций ИСЖО является поддержание заданного химического состава газовой среды в обитаемых модулях, в частности, переработки концентрированного диоксида углерода с целью генерации кислорода и получения воды.

Основным недостатком современных систем переработки диоксида углерода является высокая температура протекания реакций, равная 800-1000 С, приводящая к уменьшению надежности системы и обеспечения безопасности экипажа.

В настоящее время на стадии разработки находятся совершенно новые технологии, основанные на применении процессов переработки концентрированного диоксида углерода в растворенном в ионных жидкостях состоянии [1,2], позволяющие проводить электрохимические реакции практически при значениях температуры, равных температуре газовой среды в обитаемых гермоотсеках.

Ионные жидкости являются расплавами органических солей при температуре плавления ниже 100 С, при этом значительное их число остается в жидкостной фазе при температурах газовой среды 20-24 С, обладают ионной структурой (состоят из анионов и катионов), высокой селективностью и электропроводностью, могут быть гидрофильными и гидрофобными [3], пожаростойки, не токсичны и взрывобезопасны.

В качестве примера рассмотрена принципиальная схема системы переработки диоксида углерода, основанная на использовании ионных жидкостей в двух основных функциональных блоках: блоке концентрирования и блоке переработки диоксида углерода. Дальнейшее рензвитие данной схемы подразумевает переход к одноблочной схеме – функциональному блоку с газонаполненным электродом.

Данная технология перспективна для:

— Производства O2 на поверхности Марса.

— Производства CH4 в качестве топлива и метаболически требуемого O2 на поверхности Марса.

— Совместного электролиза CO и H2.

— Реализации 2-х стадийной реакции Боша.

Литература:

1. Серебряков В.Н. «Основы проектирования систем жизнеобеспечения экипажа космических летательных аппаратов». – М.: Машиностроение, 1983, 160 с.

2. Кустов Л.М., Васина Т.В., Ксенофонтов В.А. "Ионные жидкости как каталитические среды". - Рос. Хим. Ж., 2004, 42с.

3. Асланов Л.А., Захаров М.А., Абрамычева Н.Л. "Ионные жидкости в ряду растворителей". - М.: Изд-во МГУ. - 2005. - 272 с.

4. Jordan B. Holquist, David M. Klaus, Morgan B. Abney "Electrochemical carbon dioxide reduction with room temperature ionic liquids for space exploration missions" - 46th ICES 2016, Vienna

5. Karen D. Jayne, Daniel R. Carr "Carbon Dioxide Collection and Pressurization Technology" - 46th ICES 2016, Vienna

# Исследование ламп, наполненных ртутью с аргоном при низком давлении, предназначенных для обеззараживания воздушной среды, сточных и питьевых вод

Гвоздева М.А., Богач Е.С.
Научный руководитель — д.ф-м.н. Коссый И.А.
МАИ, Москва
ainervous@gmail.com

Известно, что длина волны 253,7 нм обладает бактерицидным свойством, которое оказывает наибольшее влияние на ДНК.

Наибольшее распространение, благодаря высокоэффективному преобразованию электрической энергии в излучение, получили разрядные ртутные лампы низкого давления, у которых в процессе электрического разряда в аргонно-ртутной смеси более 60% излучения переходит в излучение с длиной волны 253,7 нм, т.е. находится в диапазоне длин волн с максимальным бактерицидным действием.

В исследуемой нами ранее работе было приведено сравнение стандартных систем очистки воды и воздуха от грибков и бактерий с разработанной и изготовленной в ИОФ РАН установкой ОВОД. Исследованы инновационные особенности и свойства установки микроволнового источника УФ излучения, предназначенного для обеззараживания воздушной среды, сточных и питьевых вод.

В настоящей работе в институте общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук в качестве объекта исследований были организованы эксперименты по измерению интенсивности излучения ламп, наполненных ртутью с аргоном при низком давлении. Аргоновые лампы имели различные низкие давления: 2 Торр, 7.6 * 10-2 Торр и 10-2 Торр. Лампы работали на бытовом магнетроне и запитывались от блока питания, работающего как в одиночном, так и частотном режиме. Напряжение на магнетроне измерялось на блоке питания. Ток, протекавший через магнетрон, измерялся на токовом шунте при помощи осциллографа. Сопротивление шунта 10 Ом. На конце лампы стояла поглощающая нагрузка. Ультрафиолетовое излучение измерялось ФЭУ-106 с нагрузкой Rфэу = 1,6 кОм и напряжением Uфэу = 1,1 кВ. Было проведено по 3 испытания с каждой из ламп разного давления 2 Торр, 7.6 * 10-2 Торр и 10-2 Торр.

Получены графики изменения напряжения на шунте и ФЭУ с момента зажигания лампы до полного затухания. Использовался режим затухания, так как высокая температура, влияла на чистоту эксперимента. Получены графики зависимости мощности от давления, из которых можно сделать вывод, что лампа с давлением 10-2 Торр потребляет меньше всего энергии.

Таким образом, результаты эксперимента показали, что лучшим вариантом для дальнейшего использования в установках обеззараживания, по показателю расхода электроэнергии, являются безэлектродные ртутные лампы низкого давления 10-2 Торр.

Эти данные можно будет использовать для разработки бактерицидных газоразрядных источников, преимущество которых заключается в безреагентном методе очистки. Такие технологии найдут свое применения в сельском хозяйстве, животноводстве, медицине и других сферах.

# Комплексная оценка эколого-технических преимуществ материалов для авиационных энергоустановок на основе альтернативных источников энергии

Гвоздкова Ю.Д.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Черняев А.В.
МАИ, Москва
gina94@yandex.ru

Одной из актуальных проблем, связанных с развитием современной авиационной техники, является разработка экологически безопасных, технически и экономически эффективных энергоустановок, способных обеспечить высокую надежность летательных аппаратов (ЛА). В связи с исчерпанием нефти, из которой вырабатываются традиционные виды авиационного топлива (авиакеросин и авиабензин), и обострением глобальных экологических проблем, обусловленных загрязнением окружающей среды различными вредными выбросами, образующимися при сжигании указанного горючего, необходимо вести активный поиск наиболее выгодных технологических возможностей замещения авиакеросина и авиабензина возобновляемыми энергоносителями – водородным топливом, солнечными батареями и биогорючим.

В результате сравнительного анализа возобновляемых источников энергии, которые можно использовать в авиационных энергоустановках, были выявлены их ключевые преимущества и недостатки для различных ЛА на разных стадиях полетов [1] и предложена многокритериальная методика оценки особенностей замещения ими традиционных энергоносителей на основе сопоставления эколого-экономических и технологических показателей, характеризующих процессы производства и эксплуатации устройств для преобразования энергии данных источников в авиатранспортных средствах [1-3].

Аналогичную методику рекомендуется использовать и для комплексной оценки эколого-технических преимуществ материалов для авиационных энергоустановок, преобразующих энергию Солнца, водорода и биотоплива.

Основными техническими критериями при этом могут быть обеспе-ченность сырьем для производства материала; затраты энергии и степень освоенности технологии для его получения; долговечность материала; возможность использования материала в различных авиационных энергоустановках; масса и габариты энергоустановок, изготовленных из материала; возможность обеспечения высокой надежности работы энергоустановки, использующей материал; воспламеняемость материала; наличие научно-технических разработок для развития технологии получения материала; удовлетворение материала требованиям технологических стандартов и т.д.

К ключевым экологическим критериям оценки следует отнести возобновляемость ресурсов для получения материала; безопасность производства и использования материала; ресурсосбережение; удовлетворение материала требованиям экологических стандартов и т.д.

Оценку эколого-технических преимуществ рассматриваемых мате-риалов целесообразно дополнять критериями, характеризующими экономическую эффективность процессов их получения и использования в авиации. Такими критериями являются стоимость материала и авиационной энергоустановки на его основе; доступность материала; наличие инфраструктуры для производства и эксплуатации энергоустановки, изготовленной из материала; наличие спроса на внутреннем и мировых рынках материалов, оборудования и технологий; укрепление позиций на мировых энергетических и технологических рынках при производстве материала и энергоустановок на его основе; наличие законодательных и финансовых механизмов поддержки получения и использования материала и соответствующих энергоустановок; увеличение ВВП и налоговых поступлений в бюджеты различных уровней при их производстве и использовании и т.д.

Практическая реализация разработанной методики комплексного сравнения материалов для авиационных энергоустановок на основе перспективных энергоносителей может быть осуществлена с помощью метода анализа иерархий (МАИ), позволяющего выбрать оптимальное решение из имеющихся альтернатив с учетом различных предпочтений в сфере управления рисками и обеспечением экологической и техносферной безопасности [1, 3, 4].

Список литературы

1. Гвоздкова Ю.Д. Многокритериальная оценка перспективных источников энергии для авиатранспорта методом анализа иерархий // 16-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2017». 20-24 ноября 2017 года. Москва. Тезисы. Типография «Люксор», 2017. С. 373-374.

2. Гвоздкова И.А., Гвоздкова Ю.Д. Методика оценки социо-эколого-экономических преимуществ источников энергии для авиатранспорта // Экономика в условиях социально-техногенного развития мира. Материалы II Международной междисциплинарной научной конференции по фундаментальным и прикладным проблемам современного социально-экономического и экономико-экологического развития (5 октября 2017 г., г. Брянск): в 2 т. / под ред. Е.А. Дергачевой. Брянск: БГТУ, 2017. Т.2. С. 130-134.

3. Гвоздкова И.А. Математические задачи социо-эколого-ориентированной экономики // Труд и социальные отношения. 2017. №6. С. 73-84.

4. Гвоздкова И.А. Эколого-ориентированные математические модели управления рисками и обеспечением безопасности // Вестник университета. 2016. № 9. С. 200-207.

## Балльная оценка воздействия транспорта на экосистемы мегаполиса

Голоднов Д.А.
Научный руководитель — доцент, Сотникова Е.В.
Московский политехнический университет, Москва
golodnov94@yandex.ru

Экосистемы мегаполиса испытывают высокую антропогенную нагрузку в результате загрязнения атмосферного воздуха и депонирующих сред широким спектром химических веществ, из которых приоритетными являются тяжелые металлы, обладающие длительным периодом выведения из природной среды. Основным источником поступления этих веществ в почвы придорожных территорий является автотранспорт. Источниками меди и свинца является тормозная система; цинка – шины; хрома – бензины, моторные масла, тормозная система и дорожное покрытие; кадмия – моторное топливо; мышьяка – бензины и тормозная система автомобиля; ртути – топливо. Наряду с этим, происходит загрязнение городской среды бензапиреном, который на придорожных территориях является маркерным загрязнителем от автотранспорта, обладает высокой стабильностью и канцерогенной активностью. Бензапирен присутствует в атмосфере в газообразной форме и в адсорбированном виде на частицах сажи и пыли. При осаждении молекулы бензапирена покидают атмосферный воздух и накапливаются в депонирующих средах.

Содержание вредных веществ в составе отработавших газов зависит от типа двигателя, режима его работы, технического состояния автомобиля, марки бензина. Наибольшие концентрации загрязняющих веществ в выбросах наблюдаются при разгоне и торможении транспортных средств.

При оценке воздействия автотранспорта на окружающую среду основное внимание уделяется загрязнению почвогрунтов придорожных территорий и отсутствуют данные о связи уровня загрязнения с состоянием растительности вдоль дорог и интенсивностью дорожного трафика. В работе [1] проведена оценка состояния растительности придорожных территорий методом биоиндикации. Однако расчет выбросов загрязняющих веществ в

атмосферный воздух от автотранспорта по данным Департамента природопользования г. Москвы не проводился уже более 10 лет.

Таким образом, представляло интерес определить взаимосвязь между массой выбросов, загрязнением почв и состоянием древесной растительности придорожных территорий.

Для исследований были выбраны автомагистрали с различной интенсивностью дорожного трафика и фоновый участок. Содержание в почве тяжелых металлов и бензапирена определяли методом ИК- спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой [2]. Оценка уровня загрязнения почв проводилось по уравнениям Водяницкого с учетом токсичности элементов. Воздействие на растительность определялось биоиндикационным методом по величине флуктуирующей ассиметрии листовой пластинки осины обыкновенной. Расчет выбросов от автотранспорта проводился по методике [3].

Проведенные исследования позволили разработать балльную систему для оценки воздействия автотранспорта на экосистему городской среды. Выявлен вклад выбросов автотранспорта в увеличение местных фоновых концентраций тяжелых металлов, связанный с интенсивностью дорожного движения и установлены элементы, заслуживающие наибольшего внимания при проведении государственного экологического мониторинга- медь, цинк, мышьяк, кадмий, ртуть, свинец.

Список литературы:

1. Кузнецова А.С., Сотникова Е.В. Биоиндикационные показатели стабильности развития листовой пластинки Populus Tremula в условиях воздействия транспортных потоков. Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2016. №3. С. 45- 51.

2. Сорокин А.В., Сотникова Е.В., Графкина М.В., Рухович Д.И., Калинина Н.В. Безопасность жизнедеятельности. 2015. №8 (176). С. 45- 51.

3. Методика расчета выбросов загрязняющих веществ автотранспортом на городских магистралях. М., 1997.

## Экологическая безопасность космодрома «Восточный»

Ермакова Н.О.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Чверткин А.Г.
МАИ, Москва
ermakova2030@ya.ru

Плотность населения России сильно различается по регионам, в то время как большая часть общества располагается в крупных финансовых городах-миллионниках, более отдаленные регионы требуют дополнительных источников привлечения трудоспособного населения. Именно с точки зрения безопасности и развития Дальнего Востока для крупномасштабного государственного проекта космодром «Восточный» выбрана территория Амурского региона. Месторасположение для реализации запланированных программ подходит наиболее удачно в том плане, что в случае нерасчетных и внештатных ситуаций состав отбрасываемых ракетных комплексов не затронет крупные города и не попадет на территории близлежащих государств. Однако имеет место необходимость дополнительного пересмотра экологической защищенности развивающегося региона.

Не так давно общественность была потрясена тем фактом, что состав проектной документации на постройку космодрома не проходил комиссии по экологическому надзору. В соответствии с федеральным законом от 23.11.1995 N 174-ФЗ «Об экологической экспертизе» с изменениями на 28 декабря 2017 года, вступившими в силу с 1 января 2018 года, государственной экспертизе подлежат все проекты федеральных целевых программ, предусматривающих строительство и эксплуатацию объектов хозяйственной деятельности, оказывающих воздействие на окружающую среду. После начала строительства возникли и

другие проблемы уже с реализацией постройки, связанные с невыплатой подрядчиком заработной платы для строителей, а также с неудачным запуском предыдущих модификаций ракет-носителей.

По актуальным данным на 1 февраля 2018 года произведен успешный запуск ракеты-носителя «Союз» с 11 спутниками на борту. В условиях современных тенденций, связанных с обращением особого внимания к экологической безопасности, становится актуальным вопрос осуществления космических программ с предельной минимизацией вредных выбросов. По данным Роскосмоса в качестве компонентов ракетного топлива для комплекса «Союз» применяется керосин с высокой степенью очистки и жидкий кислород. Однако для более мощного РБ «Фрегат» в разгонном блоке будет учувствовать до 2000 кг гептила и порядка 42 кг амидола в качестве окислителя, оба компонента относятся к первому классу (чрезвычайно опасных) веществ.

Несмотря на высокую степень опасности для экологии региона ряд научных деятелей считают, что «Восточный» является не только двигателем для экономического развития региона, но и полагают, что применение опасных веществ никоим образом не повлияет на состояние окружающей среды.

С точки зрения повышения уровня экологической безопасности решением может стать пересмотр основных направлений, касающихся нормативного правового регулирования в вопросах экологической безопасности, а также на уровне реализация специальных дисциплин по выбору вариативной части профессионального цикла на базе высшего профессионального образования не только инженеров-конструкторов, но и специалистов в области экологической безопасности, которые в последствии решали бы вопросы мониторинга и прогнозирования в области охраны окружающей среды штатно и с учетом высокого уровня подготовки к специфике работ с космическими программами.

## Электрохимическое восстановление углерода в условиях космических экспедиций

Клепинина К.Д.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Пичулин В.С.
МАИ, Москва
kd.klepinina@gmail.com

Для проведения длительных орбитальных и межпланетных космических экспедиций актуально совершенствование систем жизнеобеспечения экипажа (СЖО). Эти системы должны извлекать максимальное количество воды из продуктов жизнедеятельности человека, регенерировать кислород, очищать атмосферу от углекислого газа и иных примесей.

Опыты эксплуатации систем жизнеобеспечения показали, что из-за массовых, объемных и энергетических ограничений неорганические регенерирующие системы предпочтительнее систем регенерации, основанных на биологических процессах.

Восстановление кислорода из диоксида углерода (углекислого газа) позволяет значительно увеличить продолжительность работы СЖО, и, как следствие, является одной из наиболее важных задач, поставленных перед современной наукой в области космических исследований. Вне зависимости от способа сбора и концентрации CO2, регенерировать кислород традиционно предлагается одним из следующих методов: реакция Боша, реакция Сабатье и реакция на твердых электролитах. Весомым недостатком всех этих способов является протекание реакций только при высоких температурах (150-600С для реакции Сабатье, более 600С для реакции Боша), что с трудом реализуемо в условиях космического корабля. Однако, существует возможность восстановить кислород из диоксида углерода электролитическим методом при комнатной температуре с ионными жидкостями.

Электрохимическое восстановление CO2 и последующая электролитическая регенерация кислорода при относительно низких температурах открывает совершенно новые возможности для создания систем жизнеобеспечения экипажа.

В данной работе рассмотрены преимущества и проблемы этого метода и предложен способ реализации, минимизирующий недостатки.

## Электроимпедансные методы анализа состава тела космонавта

Клесарева М.В.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Пичулин В.С.
МАИ, Москва
marina.klesareva@mai.ru

Изучение состава тела – сравнительно новая область биологии и медицины, которая выделилась в отдельное направление в начале XX века. Состав тела человека полностью коррелирует с показателями его физической работоспособности, а также адаптацией к среде обитания, особенно эта взаимосвязь выражена в условиях профессиональной экстремальной деятельности, к которым и относится пребывание человека в невесомости. [1]

Пилотируемые полеты в космос неизбежно связаны с воздействием на организм человека невесомости. Длительное воздействие этого фактора космического полета вызывает нарушение процессов регуляции в важнейших системах организма и приводит к его частичной дегидратации, атрофии мышц, потере минералов костной ткани и другим серьезным последствиям.

В костно – мышечной системе из – за отсутствия действия внешних сил на структурные единицы, несущих весовую нагрузку, приводит к потере кальция и других минеральных веществ, важных для поддержания целостности костей. В опытах с гиподинамией и после окончания космических полетов выявляется уменьшение объема мышц, особенно нижних конечностей. Проведенные аналитические исследования позволяют классифицировать это явление как мышечную атрофию. Также происходит уменьшение силы и тонуса мышц. Кроме этого, в мышечной структуре были обнаружены сдвиги белкового обмена. Происходит ухудшение силовых и скоростно – силовых характеристик, работоспособности.

Однако возникновение таких ответных реакций на организм можно в некоторой степени нивелировать с помощью различных средств и методов защиты от воздействия эффектов невесомости в условиях космического полета, включающих в себя физические тренировки и применения технических средств. В связи с этим необходима разработка комплекса, включающего в себя физические упражнения и технические средства оперативного медицинского контроля, которые позволят контролировать и минимизировать изменения в костно – мышечной системе.

В связи с указанными обстоятельством, актуальным является определение текущего состава тела человека в космическом полете. По текущему состоянию состава тела следует принимать решения по проведению профилактических мероприятий, например, изменять интенсивность физических упражнений. Имеется достаточно много методов определения состава тела, например, такие неинвазивные методы, как гидростатическая денситометрия, воздушная плетизмография. В качестве примера эталонных методов оценки состава тела можно назвать метод разведения индикаторов, рентгеновскую денситометрию, компьютерную томографию. Однако подобные методы исследования сопровождаются лучевой нагрузкой, сами технические устройства достаточно крупногабаритные для размещениях их на борту космического корабля.

Методом, являющимся достаточно простым в применении, не требующим существенных затрат массы и габаритов, неинвазивный, не несущим лучевой нагрузки, является электроимпедансный метод (биоимпедансный анализ – БИА). [2] Начало

практического применения биоимпедансного анализа для характеристики состава тела человека принято связывать с работами французского анестезиолога Анри Томассета, выполненными в начале 1960-ых годов.

Биоимпедансный анализ (БИА) – это контактный метод измерения электрической проводимости биологических тканей, дающий возможность оценки широкого спектра морфологических и физиологических параметров организма. Суть БИА заключается в том, что прохождение переменного тока через тело человека зависит от его конкретного состава. Эти закономерности вытекают как из физических моделей тела и его сегментов, так и из статических зависимостей между антропометрическими, физическими и другими переменными, характеризующими человеческий организм.

В работе предлагается методика определения состава тела электроимпедансным методом и алгоритм обработки полученных данных с помощью метода конечных разностей и последующего решения обратной задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Николаев Д.В., Смирнов А.В., Бобринская И.Г., Руднев С.Г. «Биоимпедансный анализ состава тела человека» – М.: Наука, 2009.

[2] Пичулин В.С., Ерюкова Т.А. «Определение состава телла человека электроимпедансным методом в условиях космического полета»- Вестник Московского Авиационного Института, Выпуск №: 2011. Т.18. №1.

## Генератор тока для передвижного магнитно-резонансного томографа

Кобзева И.Н.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Строгонова Л.Б.
МАИ, Москва
irina.kobzeva.93@bk.ru

Способ медицинского исследования с помощью магнитно-резонансной томографии (МРТ) вошел в медицинскую практику в 80-х годах прошлого века. Методом МРТ можно выявить широкий спектр самых разнообразных заболеваний. Космическая медицина в этом вопросе не является исключением. Углубленные медицинские обследования космонавтов до и после полетов с применением МРТ получили широкое распространение.

Медицинский контроль человека перед космическим полетом и после выполняется согласно структурной схеме, которая позволяет выявить все изменения, произошедшие во время полета. В настоящее время такие исследования становятся наиболее актуальными в связи с планированием длительных пилотируемых космических полетов.

Человеческое тело также обладает собственным магнитным полем, различным для разных органов. Важным моментом является поддержание относительного баланса между внешними и внутренними магнитными полями. Бесспорным является факт, что внешние магнитные поля в значительной мере определяют состояние наших внутренних магнитных полей. Электромагнитные излучения различной интенсивности могут вызвать существенные изменения в организме человека. Поэтому так важно для космической медицины поддержания гомеостаза, то есть количества ионов водорода в организме космонавтов. Этот процесс и будет служить датчиком любого изменения, произошедшего в организме.

Для реализация и обеспечения передвижной МРТ-установки, позволяющей проводить описанные выше обследования космонавтов, до и после полета необходим генератор тока. Открытие такого явления, как высокотемпературная сверхпроводимость (ВТСП) позволяет создавать абсолютно новый класс электрических машин, который обладает повышенной энергоэффективностью, улучшенными массогабаритными показателями и повышенной экологической безопасностью. ВТСП электрические машины требуют разработки новой универсальной методики расчета.

Объектом исследования является полностью сверхпроводниковая электрическая машина с ферромагнитным внешним экраном. Аналитическая методика расчета основных параметров данного типа машин была разработана в МАИ (НИУ). В частности, были выведены соотношения для определения ЭДС холостого хода (E0) и главного индуктивного сопротивления (Xa).

В качестве исходных данных используются выходная мощность, фазное напряжение и частота вращения. Очевидно, что требуемое значение мощности при заданной частоте вращения может быть получено большим количеством сочетаний размеров активной зоны электрической машины. При этом получение максимальной удельной мощности является задачей оптимального проектирования, а сама удельная мощность является критерием оптимальности, также называемым целевой функцией. Методика расчета и оптимизация размеров машины с целью получения максимальной удельной мощности реализованы в программе MATLAB.

Данную методику можно считать универсальной, она позволяет рассчитать ВТСП электрические машины абсолютно любого уровня мощности и различной частоты вращения, вычисляя максимальную удельную мощность.

Точность и универсальность выбранной методики подтверждается результатами трехмерного конечно-элементного моделирования в программной среде Ansys Maxwell. Моделирование позволяет уточнить полученные при расчете значения с учетом значения магнитной индукции в области ОВ, что невозможно при двухмерном моделировании.

Реализация МРТ при кратковременных космических полетов успешно проводится в настоящее время с использованием современных материалов и разработок. Однако технологии развития не стоят на месте. Всё больше планируется и осуществляется длительных пилотируемых космических полетов. К сожалению, пока не представляется возможным размещение крупногабаритной аппаратуры на борту космического корабля. Поэтому необходимо стремиться к поиску новых технологических решений по усовершенствованию аппаратуры, необходимой для медицинских обследований экипажа и поддержания здоровья на всех этапах полета, а также после завершения полета.

Ещё одной проблемой реализации использования МРТ исследований при длительных пилотируемых космических полетах является не до конца изученная магнитная составляющая. В настоящее время пока ещё нет никаких экспериментов, показывающих, как эта составляющая будет влиять на организм космонавта. Но уже сейчас начинают рассматривать версии взаимодействия магнитного поля с неблагоприятными факторами космического полета, а именно невесомостью. Поэтому необходимо детальная проработка вопроса магнитной составляющей описанной установки с целью дальнейшего использования на борту космического аппарата.

## Использование методов дистанционного зондирования в сельском хозяйстве

Константинова Е.П.
Научный руководитель — доцент, к.э.н. Метечко Л.Б.
МАИ, Москва
elena-konstantin@lenta.ru

Роль сельского хозяйства в экономике России значительна. Одним из важных фактором успешного развития сельского хозяйства на определенной территории является грамотное использование его потенциала агроклиматических и земельных ресурсов. Для этого необходимо последовательное изучение физико-географических характеристик исследуемого района, его климатических данных и гидрографической ситуации, а так же необходимо понимание закономерностей протекания данных процессов на определенной местности.

Одним из методов получения информации о местности является использование информации полученной в результате аэрокосмического мониторинга. Аэрокосмический мониторинг представляет собой систему контроля и отслеживания изменения процессов, происходящих на территории Земли, при помощи космической съемки и дешифровки полученных данных в определенном спектральном диапазоне. Если использовать данный метод для эффективного развития сельского хозяйства, то он принесет только положительные результаты. Полная и своевременная информация о состоянии почвы, наличия в ней полезных веществ, о температуре, атмосферном давлении и количестве осадков - может дать нам оценку качества и количества будущего урожая и, как следствие этого, прогноз цен на аграрную продукцию оказывает существенное влияние, как на экономику отдельного региона, так и на всю мировую торговлю в целом.

На спутниковых снимках прекрасно отображаются специфические черты, присущие тому или иному типу ведения сельского хозяйства.

С помощью космической съемки существует возможность контролировать сроки сбора урожая и посева, тем самым оптимизировать управление сельскохозяйственным производством.

Литература:

1. Метечко Л.Б., Дацюк М.М., вострикова С.М., Сорокин А.Е. Аэрокосмическеи средства дистанционного зондирования в экологическом мониторинге : Учеб. пособие. - М.: Изд-во МАИ, 2016. - 88с.

2. Метечко Л.Б., Сорокин А.Е., Новиков С.В., Введение в экологию аэрокосмической отрасли. Учебник.-/Калуга: Издательство «Эйдас», 2016. - 320с.

3. Голов Р.С., МетечкоЛ.Б., Мыльник А.Е., Сорокин А.Е. Экологическая инноватика - современный подход к решению глобальной проблемы человечества//Экономика и управление в машиностроении. 2016. №6. С.22-29.

## Анализ опасности падения фрагментов разрушенных ядерных энергетических установок и осаждение радиоактивных веществ на поверхность Земли

Котова А.В.
Научный руководитель — Чвёрткин А.Г.
МАИ, Москва
Kotova_arina@list.ru

Ракетно - космическая промышленность является неотъемлемой частью современного мира. Количество космических станций выходящих на орбиты с каждым годом растет. Космический мусор, образующийся в результате неудачных испытаний, отработанных ступенях и разгонных блоков ракет - носителей, отходов и технологических элементов непрерывно увеличивается. В результате чего возникает экологическая опасность, связана с возможным столкновением и падением фрагментов разрушенных ядерных энергетических установок, а так же с осаждением радиоактивных веществ на поверхность Земли. Автором был проведен анализ данного аспекта загрязнения окружающей среды.

Ещё с конца 60-х годов были выбраны орбиты для консервирования ядерных реакторов, когда уровень космического мусора не достигал больших объемов. Использование ядерных реакторов, дает человечеству недостижимый, с солнечными батареями, уровень энергии. Однако в настоящее время большинство спутников и мусора находится на низкой околоземной орбите, что в свою очередь может негативно отразится на работе навигационных систем, метеоспутников и систем наблюдения за природными ресурсами. Но всё же основной проблемой для людей, оказывается осаждение радиоактивных веществ на поверхность Земли.

Так в 1978 г. советский спутник морской космической системы разведки "Космос-954", потерпел аварию. Крупные радиоактивные осколки рассеялись на севере Канады. Всего на территорию площадью более 100 тысяч км² упало около сотни радиоактивных обломков. Специальный анализ атмосферы в разных точках планеты показал, что большая часть многотонной массы "Космоса-954" испарилась и была рассеяна в атмосфере Земли. В том числе и по крайней мере 37,1 кг отработавшего ядерного топлива. Из 41 советских (российских) космических аппаратов, использовавших ядерные энергетические установки, 6 потерпели аварии, в результате чего произошли выбросы радиоактивных веществ.

Из этого можно сделать вывод, что космонавтика была и остается сферой особо рискованной деятельности. Автором предлагается решать данную актуальную экологическую проблему путем применения современных технологий: дистанционной разведки экологической обстановки и компьютерного моделирования последствий чрезвычайной ситуации.

## Влияние длительной невесомости на организм космонавта при длительной работе на орбите и методы профилактики осложнений

Кузьменко Т.А.
Научный руководитель — доцент, к.э.н. Метечко Л.Б.
МАИ, Москва
tata.kuzmenko.98@gmail.com

Актуальность проблемы влияния невесомости на организм человека возрастает вместе с успехами активного освоения околоземного космического пространства.

Продолжительные перелёты, длительная работа на орбите и в открытом космосе требует времени для адаптации космонавта-исследователя, работающего в условиях невесомости. С целью сохранения здоровья и получения эффективных результатов работы, требующей выносливости и концентрации внимания, необходимо тщательное изучение множественных реакций органов и систем человеческого организма на отсутствие гравитации. Особенно остро на отсутствие гравитации реагирует сердечно-сосудистая система, в которой изменяется привычный режим циркуляции крови.

Первые научно-теоретические разработки в этой области были осуществлены К.Э. Циолковским. Однако изучение последствий длительного пребывания человека в состоянии невесомости произошло гораздо позже, когда появилась возможность обеспечить полномасштабные исследования в этой области и активизировать регулярную научно-исследовательскую работу космонавтов на околоземной орбите.

Цели и задачи этих наблюдений заключаются в выработке профилактических мер по борьбе с осложнениями, возникающими в непривычных условиях функционирования человека в космосе, и предупреждении необратимых процессов, которые могут возникнуть в условиях длительной невесомости.

В области разработки методик подготовки к полету и профилактики возможных негативных проявлений отсутствия гравитации на организм космонавта современные ученые достигли больших успехов.

Поскольку полеты и циклы работ на орбите становятся все более продолжительными и являются неотъемлемым средством решения повседневных нужд современного человека, проблема профилактики осложнений, вызванных длительным пребыванием космонавта в состоянии невесомости, является актуальным направлением в области исследования экологии человека.

## Тяжёлые заряженные частицы в околоземном и межпланетном пространстве

Кулагина А.М., Пронина П.Ф., Комолова Н.С.
Научный руководитель — профессор, д.б.н. Надежкина Е.В.
МАИ, Москва
Kulaginaaaaa93@gmail.com

Сбои работы бортовых компьютеров и электронных систем происходят, главным образом, из-за тяжёлых заряженных частиц. Количество и концентрация их в космическом пространстве вблизи Земли и других планет, а также между ними балансируется «солнечным ветром». Солнечный ветер - направленное перемещение частиц от Солнца к Земле. Поток солнечного ветра проходит к Земле, когда её магнитное поле ослабевает. В такие моменты тяжёлые частицы контактируют с магнитными частицами Земли, из-за чего происходит крах привычного порядка в атмосфере планеты, поскольку частицы начинают противостоять друг другу. В следствие этого появляются магнитные бури. Когда через микросхему перемещается заряженная частица с большей энергией, случается сбой в работе электронной системы, а также начинается явление «локальной ионизации». Сбои может также спровоцировать воздействие вторичных частиц.

Поскольку тяжёлые заряженные частицы находятся в непосредственной близости Земли, внутри её радиационного пояса, вероятность опасного воздействия увеличивается. Это продукты ядерных реакций, которые возникают, когда космические лучи взаимодействуют с атмосферой планеты.

На высоте 400 км находится МКС, и такие высоты называют низкими. Именно на таких высотах, в местах, где магнитное поле Земли уменьшается, можно встретить тяжёлые заряженные частицы. В этих зонах чаще всего и случаются сбои в функционировании бортовых компьютеров спутников.

Выше, на высоте 1000 км, тяжёлые заряженные частицы увеличивают область своего воздействия. Здесь возникает большая опасность негативного воздействия на организм человека, его здоровье на клеточном уровне. Воздействие на бортовые компьютеры становится ещё больше.

Перед тем, как организовать полет человека в космос, необходимо тщательно спланировать всю миссию, и особенным образом изучить траекторию движения и опасность воздействия тяжёлых заряженных частиц на электронику и организм космонавта. Нужно строго учитывать аномальные участки магнитного поля Земли. Именно поэтому важно изучать и развивать науку о космической погоде.

Литература

1. А.Л.Чижевский – Земное эхо солнечных бурь 1976
2. Т.К.Бреус – Космическая и земная погода и их влияние на здоровье людей 2010
3. ЭКОЛОГИЯ И ЖИЗНЬ №7 2012
4. Саймон Миттон - Дневная звезда 2016

## Анализ космодрома как источника воздействия на окружающую среду

Мочалова С.М.
Научный руководитель — к.т.н. Коломенцев А.И.
МАИ, Пушкино
mochalove@rambler.ru

Основные воздействия космодрома на окружающую среду (ОС) делятся на специфические и неспецифические. К первым относятся химическое загрязнение природной среды токсичными ракетными топливами (такими как несимметричный диметилгидразин), электромагнитные воздействия СВЧ и УВЧ излучений от радиотехнических систем

командно-измерительных пунктов (КИП) и т.п. К неспецифическим воздействиям можно отнести загрязнение атмосферного воздуха объектами тепло- и энергоснабжения и транспорта, разрушение природных ландшафтов при строительстве сооружений НКИ, загрязнение поверхностных вод бытовыми стоками и др. [1].

К главным источникам техногенного воздействия космодрома на ОС относятся:

- стартовые комплексы: при их строительстве изменяется ландшафт местности, кроме того, при запуске ракет-носителей (РН) происходит химическое загрязнение атмосферы и грунта продуктами сгорания компонентов ракетного топлива (КРТ), а также тепловое и акустическое воздействие на окружающую природную среду в районе стартовой площадки;
- заправочно-нейтрализующие станции (ЗНС) и хранилища КРТ: возникает загрязнение почв и грунтов из-за проливов ракетного топлива, что, в свою очередь, ведет к загрязнению поверхностных и грунтовых вод, а кроме того происходит загрязнение атмосферы парами КРТ вследствие их интенсивного испарения в местах пролива;
- склады горючесмазочных материалов (ГСМ): проливы ГСМ, происходящие в основном в местах заправки, а также на площадках временного отстоя техники, нарушают физические свойства воды и почвы;
- транспорт: основным источником загрязнения ОС в данном случае является автомобильный и железнодорожный транспорт, который загрязняет атмосферу отработавшими газами двигателей внутреннего сгорания (ДВС), содержащими углеводороды, оксиды азота, сернистые соединения, сажу и другие загрязняющие вещества;
- объекты тепло- и энергоснабжения: в данном случае происходит загрязнение атмосферного воздуха продуктами сгорания топлива (оксидами азота, оксидами углерода и др.), а кроме того наблюдаются процессы акустического и вибрационного воздействий, вызванных работой ДВС;
- свалки и полигоны захоронения твердых бытовых отходов (ТБО): как и на любом промышленном предприятии, на космодроме образуются подобные свалки, которые комплексно загрязняют ОС: грунтовые воды – так называемым фильтратом (смесью атмосферных осадков и вредных веществ, содержащихся в отходах), атмосферный воздух – свалочными газами (результатом жизнедеятельности анаэробных бактерий), которые также являются пожаро- и взрывоопасными, а, кроме того, свалки и полигоны ТБО являются благоприятной средой для жизни патогенной микрофлоры, вследствие чего представляют санитарную опасность [2].
- и другие источники.

Таким образом, космодром комплексно воздействует на все сферы окружающей природной среды. Вследствие этого необходимо совершенствовать методы по уменьшению воздействия рассмотренных факторов на ОС.

Список литературы

1. Шатров Я.Т. Обеспечение экологической безопасности ракетно-космической деятельности. - Королёв, ЦНИИмашиностроение, 2010. Монография в 3 книгах.

2 В.В. Адушкин, С.И. Козлов, М.В. Сильников. Воздействие ракетно-космической техники на окружающую среду. – Москва, ГЕОС, 2016. – 795 с.

# Нейрокостюм для поддержания тонуса мышц во время длительного космического полета

Никитина А.Е.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Пичулин В.С.
МАИ, Москва
ann_eyes@bk.ru

Как известно, микрогравитация является одним из основных негативных факторов космического полета (КП). В следствие её влияния происходит перераспределение биологических жидкостей, снятие весовой нагрузки с костей и мышц. Последнее приводит к гипокинезии и гиподинамии, что вызывает снижение физической работоспособности. Особенно остро проблема встает при возвращении весовой нагрузки при посадке на Землю, из-за чего космонавтам приходится проходить длительный курс реабилитации. Из этого можно сделать вывод, что сохранение тонуса мышц одна из важнейших задач, которую необходимо решить перед отправлением космонавтов в длительный межпланетный перелет.

Чаще всего данную проблему решают занятиями на тренажерах во время КП. Однако данный метод не совершенен, т.к. некоторые группы мышц все же не удаётся нагрузить, например, камбаловидную, которая работает только при поддержании позы под действием силы тяжести. Поэтому одним из возможных вариантов поддержания тонуса мышц является их нейростимуляция, то есть воздействие электрическими импульсами, повторяющими воздействия нервных импульсов, посылаемых мозгом.

В ходе исследования рассматривается возможность и пути реализации разработки специального костюма, который предполагается использовать в КП для профилактических мероприятий. Нейрокостюм представляет собой устройство, которое имеет свой бортовой компьютер с ИИ, датчики активности мышц (работающие по принципу схожему с методом снятия актиграфии), исполняющие устройства - электроды, которые проводят электростимуляцию мышц.

Имеющиеся датчики сканируют активность мышц в течение дня для её последующего анализа на соответствие суточной норме, необходимой для поддержания нормального состояния мышц. Затем бортовой компьютер анализирует полученную с датчиков информацию, и, при обнаружении нехватки нагрузки, подает сигнал на исполняющие устройства, где происходит электростимуляция мышц, имитирующая необходимую нагрузку. Бортовой компьютер накапливает данные о том, какая в среднем суточная активность бывает, и обучается для наибольшего уточнения необходимой дозы стимуляции. Кроме того, проводятся предварительные расчёты оптимальной суточной активности за счет анализа распорядка дня космонавта.

Для достижения точности дозы нагрузки предварительно на земле проводится настройка костюма. Для этого во время двигательной активности человека и выполнении определённых движений происходит запись сигнатуры нервных импульсов от мозга с помощью ЭЭГ для определения нейронной активности в этот момент. Затем за счет электростимуляции воспроизводятся данные движения и, таким образом, производят калибровку костюма по разработанной методике верификации настройки бортового компьютера костюма.

Электростимуляция осуществляется в фоновом режиме, чтобы не отвлекать космонавта от работы. Задаются определенные сеансы, за которые происходит восполнение суточной нормы активности.

Исследование показало, что данный метод профилактики позволит поддерживать мышцы в тонусе и снизит порог адаптации при возврате к действию гравитации, что позволит космонавтам успешно выполнять поставленные задачи. В настоящий момент проведено моделирование работы костюма, в дальнейшем предполагается проектирование и сборка прототипа для проверки имеющихся гипотез.

# Методы улучшения психофизиологической адаптации человеческого организма к условиям космического полета

Новожилов В.В.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Строгонова Л.Б.
МАИ, Москва
vitalynovo@gmail.com

Пребывание в невесомости вводит человеческий организм в стрессовое состояние, что вызывает изменения на молекулярном уровне, в белковом составе крови и оказывая существенное влияние на состояние внутренних органов. Кроме того, дополнительную нагрузку на организм оказывают такие факторы как замкнутость пространства и отсутствие социального разнообразия. Совместно они приводят к психосоматическому истощению, сбоям иммунной системы и других важных систем организма. К тому же воздействие космической радиации нарушает активность рецепторов, что вызывает индифферентное отношение организма к различному спектру медицинских препаратов, а также нарушается нейротрансмиссия, что в условиях длительных космических полетах может выявить непредвиденные нервно-психические нарушения, которые увеличат социальную напряженность, приводящую к конфликтам у экипажа космического корабля и даже к смерти его членов. Важно отметить, что психосоматическое истощение имеет прямое влияние на развитие многих болезней и синдромов таких как инсульт, инфаркт миокарда, аэрофагии, дискинезии ЖКТ, никтурии, дисменореи, гипертиреоза, и ряда других.

Патогенез психосоматических и нейросоматических нарушений обусловлен центральными нейротрофическими изменениями, патологические импульсы достигая органов, приводят к избыточной выработке норадреналина и других медиаторов, а затем к истощению их энергетических и тканевых запасов, что приводит к развитию локальных и диффузных дистрофий, а так как норадреналин активизирует фермент аденилатциклазы, катализирующий из АТФ образование циклического аденозинмонофосфата (цАМФ) из-за которого повышается активность генетического аппарата и ферментных систем под влиянием факторов космического полёта многократно увеличивается риск генетических ошибок, что в свою очередь может привести к мутациям и воспалительным процессам в организме.

Для уменьшения влияния нервно-психических факторов и увеличение психосоматической устойчивости в условиях космоса, необходимо предупредить возможные патологические процессы ещё до отправки экипажа, используя профилактические методы воздействия на организм для улучшения психофизиологической адаптации к условиям космического полета, а также введение веществ, обладающих высоким сходством со специфическими мембранными рецепторами и имитирующие действия нейромедиаторов, с помощью вживленного в организм имплантата, что позволит дистанционно контролировать дозировку и временные промежутки введения препаратов.

Основные нейромедиаторы человеческого организма, отвечающие за нормализацию общего психофизиологического состояния относятся к биогенным аминам, классу триптаминов. Одним из самых близких по химическому строению имитаторов является имитатор нейромедиатора-гармона серотонина – псилоцин, его психотерапевтические свойства, при очень низкой физической токсичности, снижают активность пассивного режима в работе мозга и оказывают влияние на адаптацию благодаря улучшению связи и увеличению взаимодействий между различными частями мозга, благодаря которым потенциально организм сможет адаптироваться на молекулярном уровне к условиям невесомости.

Для более углубленного изучения воздействия псилоцина, необходимо провести серию исследований на живых организмах invitro в условиях невесомости с использованием функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ).

## Использование методов дистанционного зондирования Земли для нужд экологического контроля

Пагур Е.С.
Научный руководитель — доцент, к.б.н. Мессинева Е.М.
МАИ, Москва
jane.pag@mail.ru

Использование методов дистанционного зондирования Земли (далее - ДЗЗ) является перспективным и быстро развивающимся направлением в сфере надзора и контроля экологического состояния Земли. Эти методы основаны на следующем принципе: отраженные и испускаемые от земной поверхности электромагнитные излучения фиксируются сенсорами, расположенными на орбитальном спутнике. Полученные данные передаются в наземные комплексы приема и обработки информации, в которых они обрабатываются и анализируются. Одним из важнейших преимуществ использования методов ДЗЗ является возможность оперативного получения необходимой информации об участке земной поверхности большой площади независимо от его местонахождения и доступности.

Основными направлениями использования ДЗЗ для нужд экологического контроля являются:

- мониторинг крупных объектов;
- выявление экологических проблем и нарушений;
- планирование проверок и рейдов;
- формирование доказательной базы выявленных экологических нарушений;
- контроль исполнения предписаний.

В результате можно выявить следующие проблемы:

- нарушение режима водоохранных зон и особо охраняемых природных территорий, изменение границ водных объектов;
- безлицензионное недропользование, выход за пределы горного отвода;
- несанкционированные свалки;
- выход объекта размещения отходов за границы отвода, эксплуатация закрытого объекта размещения отходов;
- несанкционированные сбросы и выбросы;
- нефтеразливы.

Одной из важнейших задач, решаемых, в том числе и с помощью ДЗЗ, является надзор за соблюдением требований при обращении с отходами производства и потребления. С помощью данных методов можно получить следующие сведения:

- выявление несанкционированных свалок ТБО;
- превышение допустимых площадей полигонов ТБО;
- выявление фактов несанкционированной эксплуатации закрытых полигонов ТБО.

Для решения указанных задач необходимо наличие актуальных данных ДЗЗ высокого пространственного, разрешения на объект интереса и прилегающую к нему территорию.

Эти задачи обычно выполняются методом визуального дешифрирования космических снимков (метод основан на сопоставлении доступного массива информации о ключевых участках (эталонах) с полученными результатами), в ходе которого выполняются:

- определение площадей несанкционированных свалок ТБО;

- определение фактов выхода полигонов ТБО за границы допустимой площади в соответствии с проектами строительства полигонов;
- определение фактов нарушений нормативов размещения полигонов ТБО (в том числе, в части минимального допустимого расстояния до жилых районов, водных объектов);
- определение изменений площадей действующих и недействующих полигонов в ретроспективе;
- выявление фактов появления автотранспорта, наличие подъездных дорог и т.д. (для недействующих полигонов ТБО).

## Идея разработки автономной системы индивидуального жизнеобеспечения для экипажей вертолетов, выполняющих полеты в регионы с экстремально низкими температурами

Семенов Д.А.
АО "МВЗ им. М.Л. Миля", Москва
sda1094@gmail.com

Полеты в Арктику на вертолетах сопровождаются необходимостью комплектовать летный состав такими средствами индивидуального жизнеобеспечения, которые обеспечивали бы комфортные условия труда в условиях отрицательных температур и выживаемость при аварийных ситуациях.

В настоящей работе предлагается идея разработки легкого автономного скафандра жизнеобеспечения.

В состав скафандра входят гидравлическая и электрическая системы обогрева, система вентиляции пододежного пространства, а также электрическая система управления. Гидравлическая система сосредоточена на торсе носителя; она состоит из насоса, блока нагревателя, разветвленного трубопровода и коллектора. Электрические нагревательные накладки располагаются в стельках, в перчатках, в защитной балаклаве, на локтевых и коленных участках скафандра. Система вентилирования пододежного пространства состоит из входного устройства с сервозаслонкой, воздушного компрессора, блока нагревателя и нескольких перфорированных трубопроводов.

Система автоматического управления представляет собой командный блок с установленным программным обеспечением, автоматически регулирующим работу средств терморегуляции. К этому относится управление электромоторами насоса и компрессора, сервоприводом заслонки входного устройства вентиляции, нагревателями гидравлической и вентилирующей систем и нагревательными накладками. Входным массивом данных для процессора командного блока являются сигналы с четырех термопар, монтированных снаружи и внутри скафандра, в гидравлической и вентилирующей системах.

Скафандр спроектирован таким образом, что движения в нем не затруднены, габариты носителя практически не увеличиваются, а весовая нагрузка от компонентов систем скафандра равномерно распределяется по опорно-двигательному аппарату человека.

Тканевая часть скафандра состоит из двух оболочек-комбинезонов. Первая - внешняя, защищает носителя от внешних условий окружающей среды и механических воздействий на скафандр. Выполняется из пакета разных тканей, мембраны и уплотнителя, что позволяет достичь отличных показателей по водонепроницаемости и сохранении тепла; имеет свободный покрой. Вторая - внутренняя, выполняет роль каркаса, на который монтируются все системы скафандра; имеет прилегающий покрой.

Автономность работы систем терморегуляции обеспечивается блоком аккумуляторных батарей, однако, скафандр может работать и в стационарном режиме, имея разъем для подключения к бортовым источникам электропитания и шланг для подключения системы вентилирования скафандра к бортовой системе вентилирования снаряжения экипажа.

В работе были предложены: внешний облик легкого скафандра и внутренней оболочки с монтажом систем; структурные и принципиальные схемы систем гидравлической терморегуляции и вентиляции пододежного пространства, функциональная схема системы автоматического управления скафандром.

## Проблема экологического образования и воспитания в школе и пути её решения

Суворова О.С.
Научный руководитель — доцент, Галкина Е.Е.
МАИ, Москва
olya.explay@yandex.ru

Современное образование рассматривается как важнейший фактор модернизации общества. Экологическое образование является особой образовательной областью, призванной реализовывать идею становления информационно-экологического общества, в котором высшей ценностью будут жизнь человека на Земле, забота о чистой окружающей среде, для обеспечения целей устойчивого развития. 2017 год был объявлен годом экологии – это сделано для того чтобы общество более серьезно стало относиться к проблемам загрязнения окружающей среды, осознав необходимость остановить катастрофическое загрязнение.

Экологическое образование очень важно для экологического воспитания личности. На данный момент актуальна проблема осознания сегодняшними подростками важности заботы об окружающем мире. Хоть в школах на всех уровнях уже реализуется смешанная модель экологического образования, включающая в себя такие виды деятельности, как тренинги, семинары, проектно-исследовательская деятельность, экологические акции (субботники, «Посади свое дерево»), но около 60% учащихся игнорируют возможность получения экологических знаний, не осознают важность экологических проблем своей страны и мира.

Для решения проблемы повышения эффективности экологического образования и воспитания школьников можно предложить следующие шаги:

1) Необходимо формирование «экологического мышления», эта задача должна решаться реализацией образовательных программ в младших классах и в дошкольных учреждениях. На начальных этапах образования детей необходимо уделять внимание художественной литературе, рассказывающей о природе и животных (например, рассказам таких известных авторов, как В. В. Бианки и М. М. Пришвин и др.)

1) Необходима реклама в средствах массовой информации для убеждения в важности решения экологических проблем. В любых СМИ, видео на Youtube или в других социальных сетях не должно популяризироваться разбрасывание или накопление мусора, наоборот, должны включаться эпизоды, когда герои каких-либо фильмов, сериалов или передач демонстративно выбрасывают мусор в мусорные контейнеры, или даже сортируют мусор по новой системе. Это важно для формирования психологических установок личности.

2) Необходима наглядная демонстрация реальной ситуации. К сожалению, среди современной молодежи «не модно» ухаживать за природой и окружающим миром, заботиться о нем. Поэтому нужно показать учащимся реальное состояние экологической ситуации вокруг них. Уроки на природе, специальные программы, где ученики посещают реальные места скопления мусора и т.п. Они должны сами увидеть и ощутить на себе все результаты плохой экологии.

3) Необходим личный пример. Дома, в школах, в центрах досуга, везде старшие поколения должны показывать пример заботы о природе. Такое поведение должно стать обыденным.

4) Необходимы объяснения новшеств в решении разных экологических проблем. Нужно разъяснить, как использовать новые контейнеры для сортировки мусора и другие нововведения. Причем, разъяснения не должны ограничиваться только словами, необходимо предоставить возможность попробовать самим для получения более полного представления, также необходимы наглядные иллюстрации.

Мы можем сформировать экологическое мышление, начиная экологическое образование на ранних этапах формирования личности.

## Анализ основных методов очистки от загрязнения почвы несимметричным диметилгидразином (гептилом)

Татарникова В.В.
Научный руководитель — доцент, к.б.н. Мессинева Е.М.
МАИ, Москва
vika.tatarnik@mail.ru

В результате эксплуатации авиационной и ракетно-космической техники неизбежно загрязнение окружающей природной среды компонентами используемого топлива и его производными. К числу самых опасных для окружающей среды и здоровья населения является несимметричный диметилгидразин (НДМГ), он же гептил, а также продукты его деструкции: нитрозодиметиламин (НДМА), диметиламин (ДМА), тетраметилтетразен (ТМТ), формальдегид (ФА). Гептил относится к группе канцерогенных и мутагенных веществ 1-ого класса опасности, а его ПДК в воздухе составляет 0,001, в воде 0,02 мг/л, предельно допустимый уровень в почве – 0,1 мг/кг [1]. Стоит отметить, что из всех компонентов окружающей среды наибольшему воздействию гептила подвергается почвенный покров. Данные различных исследований определяют время жизни НДМГ в почве в диапазоне от 5 до 20 дней, но зафиксированы случаи более длительного нахождения в почве этого вещества.

В качестве возможных решений по обезвреживанию почвенного покрова используются различные виды очистки от НДМГ. На данный момент известны следующие методы: химические, термические, адсорбционные, биологические [1]. Данный ряд способов очистки почвы используются в зависимости от таких факторов, как климат местности и ее географического расположения. Рассмотрим каждый из способов подробнее.

Следует отметить, что при использовании химических методов очистки почвы от НДМГ не требуется выемка почвы с места загрязнения. Использование химических реактивов может увеличивать скорость самоочистки почвы, что постепенно приводит к ускорению восстановления ее потребительских свойств. Одним из недостатков использования данной группы методов является возможное образование других токсических веществ в почве, что указывает на ограниченность его сферы применения.

Термические методы (сжигание) быстро приводят к значительному снижению концентрации гептила в почве, однако при этом возможно нарушение температурного режима почвы и загрязнение атмосферы. Кроме того, этим методы требуют определенной сложности в аппаратурном оформлении.

Основными преимуществами использования адсорбционных методов являются относительная дешевизна и возможность повторного использования реагентов. Необходимо учесть, что применение этой группы очистки почвы от гептила может быть затруднено в различных климатических условиях.

При применении биологических методов возникает сложность в подборе биопрепаратов, подходящих для конкретной местности. Преимущество этой группы над другими заключается в удалении широкого спектра загрязнений, а также в способности биомассы к саморегуляции процесса очистки.

Таким образом видно, что все распространённые методы обладают своим набором преимуществ и недостатков, поэтому выбор оптимального из них является трудной задачей. Вот почему зачастую наблюдается применение сочетания возможных видов. Использование такого комплекса методов носит наиболее эффективный характер, который обеспечивает максимально возможное очищение почвенного покрова от воздействия гептила.

Список использованной литературы

1. Мессинева Е.М., Фетисов А.Г. «Проблема загрязнения почвы гептилом и существующих методов ликвидации этой проблемы». Сборник докладов «Энерго- и ресурсосберегающие экологически чистые химико-технологические процессы защиты окружающей среды», II Международная научно-техническая конференция. – Белгород, 2016.

## Применение криогенных технологий в интегрирование СЖО экипажа межпланетного КА

Федосеев Г.А.
Научный руководитель — Шангин И.А.
МАИ, Москва
79672932795@yandex.ru

Переход к длительным межпланетным пилотируемым полетам предопределяет определенные требования к интегрированным системам жизнеобеспечения (ИСЖО) на борту межпланетного пилотируемого аппарата (МПА). Системы жизнеобеспечения, предназначенные для полетов на околоземной орбите, созданные и эксплуатируемые на орбитальных космических станциях, по своим показателям надежности и массоэнергетическим характеристикам не удовлетворяют требованиям, предъявляемым к системам МПА. Поэтому возникла проблема создания нового поколения ИСЖО на основе новых технологий и полифункциональности.

Одной из основных функций ИСЖО является поддержание заданного химического состава газовой среды в обитаемых модулях, в частности, получения и переработки концентрированного диоксида углерода с целью генерации кислорода и получения воды. Обеспечение полифункциональности предопределяет необходимость перехода от отдельных систем реге-нерации продуктов метаболизма экипажа в исходные компоненты среды обитания к системам, имеющим возможности выполнения нескольких функций.

Основным недостатком современных систем переработки диоксида углерода является высокая температура протекания реакций, равная 800-1000□С, приводящая к уменьшению надежности системы и обеспечения безопасности экипажа.

Одним из перспективных направлений является создание системы на криогенных технологиях, основанных на технологии разделении многокомпонентных газовых смесей «вымораживания – плавления» с использованием криогенных температур [1,2].

Техническая реализация данной технологии основана на разных температурных уровнях затвердевания большинства паров органических микропримесей, воды и диоксида углерода, содержащихся в газовой среде обитаемых модулей и использовании теплоты, поступающей от внешних и внутренних источников на стадии плавления твердых фаз органических микропримесей, воды и диоксида углерода, что позволяет получать в единой системе следующие целевые продукты:

— микропримеси органических веществ в жидкой фазе;
— конденсат атмосферной влаги с малым содержанием микропримесей;
— концентрированный диоксид углерода в газообразной фазе.

Дополнительным эффектом применения данной технологии является возможность использо-вания отводимых технологических потоков в качестве источника холода в системе обеспечения теплового режима.

В качестве прототипа системы, основанной на данной технологии, принята опытная система, разрабатываемая по заданию NASA исследовательским центром Ames и Jet Propulsion Labo-ratory [3] с использованием цикла Стирлинга [4]

Проведены результаты предварительного анализа прототипа и намечены направления создания ИСЖО на основе рассматриваемой технологии.

Литература

1. Кричевский И.Р. Понятия и основы термодинамики. М., Госхимиздат, 1962 г. 444с.

2. Привалова Е.И. Поглощение CO2 : традиционные подходы и современные методы, основанные на использовании ионных жидкостей / Е.И. Привалова [и др.] // Успехи химии.- 2012. - 81(5). – С.435-457.

3 Paredes-Garcia J., Nakazono B, Voecks G, Rodriguez J., Jones J., Jan D, Hogan J.

CO2 and Trace Contaminant Removal System for Manned Missions beyond LEO. 46th International Conference on Environmental Systems. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2016.

4.Ридер Г., Хупер Ч. Двигатели Стирлинга: Пер. с англ.-М.: Мир, 1986.-464с., ил.

## Анализ существующих систем обеспечения жизнедеятельности российского сегмента международной космической станции и обоснование их использования

Харитонов А.К.

Научный руководитель — доцент, к.т.н. Торпачев А.В.

МАИ, Москва

pe4kinproshka@mail.ru

Средства водообеспечения на международной космической станции относятся к системам обеспечения жизнедеятельности. Системы обеспечения жизнедеятельности - это приоритетные системы на обслуживание которых космонавт тратит много рабочего времени и это неспроста, ведь именно от них зависит насколько благополучно будет чувствовать себя космонавт во время орбитального полета, каким воздухом он будет дышать, какую воду употреблять, какой внешнее давление, температуру, влажность на себе испытывать.

Как известно вода жизненно необходима для любого организма и на орбите ей отводится отдельное внимание. Средства водообеспечения контролируют и принимают участие в водообмене на российском сегменте МКС и создают необходимые условия для нормальной жизнедеятельности.

Характерной особенностью систем обеспечения жизнедеятельности является их замкнутость, в совокупности они дополняют друг друга, но не столь эффективно как хотелось бы, именно поэтому современные научные тенденции в космической отрасли направлены на увеличение этой замкнутости. Средства водообеспечения не исключение.

Исходя из вышесказанного можно выделить несколько основных тезисов:

- водообмен в условиях герметичного объема играет важную роль в повседневной жизнедеятельности;

- повышение эффективности работы средств водообеспечения путем их модернизации или полной замены той или иной системы повысит замкнутость водообмена и окажет влияние на количестве доставляемой с Земли воды, уменьшит кол-во отправляемых грузовиков.

Из проведенного анализа средств водообеспечения российского сегмента МКС, сравнительного анализа различных внутренних, физико-химических процессов был сделан вывод о том что используемые в системах на российском сегменте МКС технические решения, на момент создания, являлись самыми адекватными, как с точки зрения эксплуатации той или иной системы, так и ее эффективности, но с учетом развития науки и

техники вопрос о модернизации тех или иных систем является актуальным, особенно в отношении средств водообеспечения.

1. Глушко А.А. Космические системы жизнеобеспечения. М., Машиностроение, 1986.

2. Протасов Н.Н. Исследование параметров водно-энергетического баланса человека в условиях замкнутого объема в качестве критериев оптимальности условий обитания. М., МАИ, 1983.

3. Данилов Н.В. Физиологические основы питьевого режима и терморегуляции. М., Медгиз., 1992.

4. ГОСТ 50804-95 Среда обитания космонавта в пилотируемом космическом аппарате.

## Инновационная технология очистки воздуха при защите оператора мобильных и стационарных объектов

Чалов А.Ю.

Научный руководитель — доцент, к.х.н. Сотникова Е.В.

Московский политехнический университет, Москва

Anton.ch50@gmail.com

При работе машин и технологического оборудования в атмосферу выделяются вредные для здоровья человека твердые частицы и газообразные примеси. При паяльных работах в воздухе присутствуют пары олова, свинца, канифоли, а при запайке пластмасс (например, полиэтиленовых изделий) в него поступают пары фенола, стирола, ацетальдегида и уксусной кислоты.

Учитывая особенности условий эксплуатации указанных объектов, разработаны соответствующие им достаточно эффективные локальные очистители воздуха. Однако из-за технической разобщенности разработчиков ввиду отсутствия единой системной стратегии при создании аппаратов по сути одного и того же функционального назначения реализованы разнохарактерные неунифицированные между собой устройства узконаправленного применения, что не отвечает современным требованиям «Экологической концепции» стандарта ИСО TR 14062 (2002 г.), заключающимся в следующем [1]:

1) повышенная эффективность использования путем совмещения выполняемых функций;

2) унификация путем использования в конструкции освоенных промышленностью деталей и узлов;

3) повышенная долговечность за счет увеличения срока службы и облегчения технического обслуживания;

4) возможность восстановления и рециклирования;

5) способность к дальнейшему совершенствованию конструкции с учетом появления инновационных технических и технологических решений.

В связи с указанными требованиями ставится задача по совершенствованию техники локальной защиты оператора на основе рациональной технологии обработки воздуха.

В аппаратах сухой очистки воздуха для улавливания ряда газообразных примесей используется технология их адсорбции на твердых поглотителях [2], обладающих различной пористой структурой (активные угли, цеолиты, силикагели и др.). Для удаления из воздуха оксидов азота NOx и углеводородов CmHn наиболее предпочтительным является активный уголь. Однако монооксид углерода CO им не улавливается, и здесь необходима химическая адсорбция (химическое взаимодействие между соответствующим адсорбентом и CO), т.е. в конструкции следует иметь дополнительную ступень очистки от такой ГП. Для этого применяют каталитическую очистку газов.

К каталитически активным веществам относят смесь оксидов меди и марганца (хопкалиты или гопкалиты). При химической реакции окисления CO в CO2 выделяется

теплота. Из-за этого при эффективности окисления до 95% температура обрабатываемого воздуха может подняться до 600С. Таким образом на оператора подается подогретый воздух, что недопустимо. Это вызывает необходимость введения в конструкцию дополнительной ступени его охлаждения [2], что существенно усложнит аппарат в целом.

Установлено [3], что высокоэффективная механическая очистка воздуха от мелкодисперсных ТЧ может быть обеспечена в орошаемой водой интенсифицированной насадке регулярной структуры, где температура обрабатываемого воздуха снижается.

Предложена технология мокрой очистки воздуха в интенсифицированной насадке регулярной структуры из пластин пористой пластмассы, орошаемой водой с растворенными в ней активными химическими добавками KMnO4 и Na2CO3, способной защитить оператора от воздействия вредных примесей, с технической реализацией этой технологии в едином для всех случаев локальном водоиспарительном аппарате, где воздух к тому же охлаждается. В таком аппарате широко использованы узлы и детали, выпускаемые промышленностью, он удобен в обслуживании и может быть усовершенствован путем введения в его конструкцию инновационной насадки со сниженной материалоемкостью, пластины которой могут производиться по отработанному в нашей стране безотходному технологическому циклу с горячим формованием их под давлением из смеси порошкового термопласта и хлористого натрия.

При таком наполнении частицы последнего соприкасаются друг с другом, образуя «нити проводимости» через весь слой композита. При промывке водой хлористый натрий удаляется из пластин, которые после просушивания приобретают микрокапиллярную структуру. Рассол же выпаривается и дает порошкообразный хлористый натрий, который снова используется в производстве пластин. Такие пластины, в рамках «Экологической концепции», являются альтернативой изделиям из мипластовых сепараторов.

Список литературы:

1. Графкина М.В., Михайлов В.А., Иванов К.С. Экология и экологическая безопасность автомобиля: Учеб.- М.: ФОРУМ, 2009.- 320 с.

2. Техника и технология защиты воздушной среды: Учеб. Пособие для вузов/ В.В.Юшин, В.М.Попов, П.П.Кукин и др.- М.: Высш. шк., 2005.-391 с.

3. Михайлов В.А., Сотникова Е.В., Калпина Н.Ю. Оценка работы водоиспарительного локального воздухоохладителя кабин наземных транспортных средств. Безопасность жизнедеятельности. 2017. №6 (198). С.7-12.

## Влияние незаконных полигонов ТБО на аэропорты

Шаталова М.Ю.
Научный руководитель — доцент, к.э.н. Метечко Л.Б.
МАИ, Москва
dream765@mail.ru

Вопрос утилизации и переработки промышленных и бытовых отходов в России принимает все более строгий характер. Из-за постоянного увеличения потребляемых ресурсов во всех странах происходит увеличение отходов. В быстроразвивающихся странах данная закономерность прослеживается наиболее явно.

Большую часть проблем несут в себе бытовые отходы. Полигоны и свалки становятся основным местом хранения такого мусора. Продукты разложения попадают в воду и почву. В России с каждым годом издаются новые законы и нормы по утилизации и обезвреживанию отходов, но, несмотря на это, постоянно образуются незаконные полигоны ТБО.

Находясь рядом с аэродромом такие свалки представляют наибольшую опасность. Отходы привлекают большое количество птиц, которые мешают полету самолетов. Стоит

отметить, что одно столкновение с птицей не обязательно будет нести катастрофические последствия, но даже это небольшое столкновение может стать предпосылкой к авиационному происшествию. Примером может послужить 2007г., когда в аэропорту Домодедово из-за столкновения с птицей упал самолет.

Авиакомпании стали привлекать к данной проблеме орнитологов. Задача орнитологов состоит в том, чтобы территория аэропорта не была такой привлекательной для птиц. Поэтому приходится осушать заболоченные участки, вырубать кустарники и ликвидировать мусор.

Для предотвращения аварий и происшествий необходимо усилить контрольный режим за несанкционированными полигонами ТБО и усилить законодательные нормы по данному направлению.

Список использованной литературы

1. Метечко Л.Б., Тихонов А.И., Сорокин А.Е., Новиков С.В. Влияние экологических нормативов на развитие авиационного двигателестроения//Труды МАИ. - 2016. - №85. - С.9.
2. Кирсанов Сергей Алексеевич, Мустафин Глеб Витальевич Мировой и Российский опыт утилизации твердых бытовых отходов // Вестник ОмГУ. Серия: Экономика. 2014. №2. С.114-120
3. Голов Р.С., Сорокин А.Е., Метечко Л.Б., Мыльник А.В. Экологическая инноватика - современный подход к решению глобальной проблемы человечества // Экономика и управление в машиностроении. - 2017. - №2. - С. 5-11

## Применение имитационного моделирования при формировании уровней загрязнения газовой среды межпланетного пилотируемого аппарата микропримесями, выделяемыми экипажем

Шустров Т.Л.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Курмазенко Э.А.
МАИ, Москва
tistrov@gmail.com

Осуществление длительных космических миссий, связанных с автономными межпланетными полетами к планетам Солнечной системы предопределяет приоритет совершенствования всех бортовых систем и, в первую очередь, систем жизнеобеспечения экипажей. Одной из основных функций интегрированной системы жизнеобеспечения (ИСЖО) межпланетного пилотируемого аппарата (МПА) является поддержание заданного химического состава газовой среды обитаемых гермомодулей (ОГМ). При этом особое значение при длительных полетах приобретают проблемы обеззараживания и очистки атмосферы от органических и неорганических микропримесей.

Для обоснования выбора технологий для системы очистки атмосферы от микропримесей разрабатывается имитационная модель источников и стоков отдельных микропримесей (ИМИС), учитывающая различные технологии их удаления из газовой среды.

Одним из основных источников микропримесей на борту летательных аппаратов является экипаж. В процессах метаболизма со средой обитания 1 космонавт выделяет в сутки в среднем ≈ 160 мг микропримесей. Более 400 химических соединений выявлено на данный момент в составе метаболических выделений человеческого организма:

— Выдыхаемый воздух – 149 веществ;
— Моча – 183 вещества;
— Фекалии – 196 веществ;
— Поверхность кожи – 271 вещество.

Качественный и количественный состав микропримесей зависит от ряда ниже--перечисленных факторов:

— рациона питания;
— температуры и влажности газовой среды;
— энергозатрат при выполнении отдельных видов работ.

Рассмотрены формирование формализованного описания звена «экипаж» как функционального блока эколого-технической системы МПА и создание подпрограммы в среде виртуальных приборов LabVIEW-2016, входящей в структуру ИМИС.

Приведены результаты вычислительных экспериментов, показывающие влияние вышеперечисленных факторов на выделение микропримесей данного звена.

# Секция №5.6 Эксплуатация и безопасность аэрокосмических систем и комплексов

## Пространственный мониторинг ресурсов на аэрокосмическом предприятии или наземном комплексе

Аносов Е.А.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Терентьев М.Н.
МАИ, Москва
kancler-junior@yandex.ru

Одним из важных факторов повышения эффективности работы аэрокосмических предприятий и наземных комплексов является оптимальное распределение, контроль положения и учет оборудования, материалов и людских ресурсов, используемых в производстве или при проведении работ по техническому обслуживанию. Управление человеческими ресурсами в системе менеджмента качества рассматривается как один из факторов, повышающий эффективность организации в целом. В этой связи задачи корректной организации мониторинга различных ресурсов является достаточно актуальными.

С увеличением использования промышленной автоматизации увеличивается потребность в надежных программных решениях для мониторинга и наблюдения за различными объектами на предприятии. Также всё более востребованным становится направление indoor-навигации и это уже привлекло внимание таких крупных игроков на рынке, как Google, Apple, Qualcomm, Broadcom, Sony и других [1].

В условиях авиационных и аэрокосмических предприятий особую сложность для реализации данной задачи традиционными методами, такими как GPS-навигация, представляет значительный радиочастотный фон, а также большое количество отражающих и поглощающих поверхностей, вследствие чего сигнал очень быстро ослабляется, возникает многолучевость распространения, беспроводные устройства начинают работать в условиях непрямой видимости. Все это накладывает отпечаток на производительность, надежность и долговечность компонентов, составляющих систему ресурсного мониторинга посредством систем навигации. Основным недостатком систем спутникового позиционирования является сложность их применения в закрытых помещениях.

Среди многих вариантов устройства сенсорных сетей [2], применяемых для мониторинга различных параметров [3, 4], для решения проблем внутреннего мониторинга положения объектов на предприятии наиболее перспективным является использование информационной системы, которая следит за ресурсами с помощью радиочастотных идентификационных меток (RFID – англ. radio frequency identification). Эта технология представляет собой большую базу меток и считыватели, которые указывают на место, где метки были обнаружены в последний раз. Также сейчас активно развивается технология iBeacon. Она основана на передаче данных через Bluetooth. Маяк (передатчик) периодически, с интервалом от долей секунды до нескольких секунд, передаёт пакеты установки соединения, не устанавливая само соединение, с принимающим устройством. Передающаяся с маяка информация с помощью специальной разработанного приложения позволяет определять местоположение принимающего устройства. Эти две технологии в данный момент активно распространяются и прогрессируют, и используются не только в повседневной жизни, но и активно продвигаются в различных видах промышленности, в том числе аэрокосмической.

Литература.

1. Навигация в помещениях [Электронный ресурс] // URL: https://habrahabr.ru/post/245325/

2. Терентьев М. Н. Обзор публикаций, посвящённых самоорганизации беспроводных сенсорных сетей // Труды МАИ. 2017. №94. URL: http://mai.ru//upload/iblock/43d/terentev_rus.pdf

3. Гинзбург И.Б., Падалко С.Н., Терентьев М.Н. Система мониторинга крупномасштабных объектов на базе многошлюзовой БСС с автономными отказоустойчивыми веб-клиентами // Электросвязь. 2017. № 9. С. 60-66.

4. Гинзбург И.Б., Падалко С.Н., Терентьев М.Н. Концепция систем дистанционного мониторинга процессов производства и испытаний аэрокосмической техники на основе многошлюзовой беспроводной сенсорной сети с автономным веб-приложением // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. № 4. С. 58-61.

## Определение технического состояния рабочих жидкостей по анализу параметров цифровых спекл-изображений

Астахов М.О., Манучаров Д.Р., Москвин Н.В.
Научный руководитель — к.т.н. Павлов П.В.
ВУНЦ ВВС «ВВА», Воронеж
pavlov.pave@yandex.ru

Важную роль в обеспечении безопасности полетов самолетов во всем мире играет поддержание в исправном состоянии их топливных, гидравлических и масляных систем. От состояния рабочих жидкостей (гидравлическое масло, моторное, авиационное топливо) полностью зависит исправность воздушного судна и как следствие его безаварийная эксплуатация.

Для обеспечения безопасности полетов воздушных судов существенным является контроль качества заправляемого авиатоплива. Мировая практика показывает, что в настоящее время на этапах заправки воздушного судна продолжается применение методик оптико-визуального способа определения технического состояния авиационного топлива на предмет присутствия в нем воды и механических примесей. Как правило, данный способ основан на визуальном осмотре пробы топлива, взятой из емкости топливозаправщика, в ходе которого авиационный инженер, опираясь на возможности своего зрения и практический опыт, принимает решение о качестве авиационного топлива. При таком «визуальном» методе существует вероятность ошибки из-за слабого зрения, физического утомления, спешки, невнимательности контролера. Необходима разработка более точных, с метрологической точки зрения, способов и устройств определения обводненности авиационных топлив в условиях аэродрома. Известны работы, в которых предлагается решить данную проблему с применением новых методов контроля.

Способ заключается в следующем порядке. После отбора жидкую пробу перемешивают, формируют спекл-поле лазерного излучения, регистрируют спекл-изображения лазерного пучка, прошедшего через контролируемую жидкость. Затем выдерживают некоторое время до полного оседания примесей в пробе жидкости и повторно регистрируют спекл-изображение. Оценку параметров примесей проводят по значению коэффициента корреляции двух спекл-изображений, зарегистрированными в возбуждённом состоянии пробы жидкости и в состоянии её покоя.

Для оценки эффективности предлагаемого способа определения примесей в жидких средах была подготовлена экспериментальная установка, в качестве контролируемой жидкости использовалось авиационное топливо ТС-1, которое заливалось в кюветы из оптического стекла объемом 15 мл с разным количеством содержания воды (1%, 2%, 3%, 4% и 6%). В качестве инструмента обработки спекл-фотографий на основании предложенного

алгоритма обработки спекл-фотографий был разработан специализированный программный модуль. В качестве языка программирования использовался Java SE, для определения энергетического обработки спекл-изображений были применены следующие бесплатные библиотеки: JTransforms для реализации быстрого дискретного Фурье преобразования и JFreeChart (AFreeChart) для построения графиков различных видов.

Полученные в ходе эксперимента графики показывают изменения энергетического спектра спекл-фотографий по мере затухания перемещений исследуемой жидкости в кювете, вызванных вынужденными колебаниями (перемешиваниями). Построенные в результате графики затухания коэффициента энергетического спектра позволяют различать случаи с различным процентным содержанием воды в керосине.

Применение выбранного способа к контролю рабочих жидкостей требует дальнейшей проработки и создания методик по контролю конкретных рабочих жидкостей.

## Автоматизированная медицинская система отбора персонала для обеспечения безопасной эксплуатации аэрокосмических систем и наземных комплексов

Афанасьева О.В.
Научный руководитель — к.т.н. Гинзбург И.Б.
МАИ, Москва
olafanaseva@mail.ru

Целью работы является разработка автоматизированной медицинской системы отбора персонала для обеспечения безопасной эксплуатации аэрокосмических систем и наземных комплексов.

В результате прогресса информационных технологий, стали появляться автоматизированные системы, которые упрощают и повышают качество работы кадровых отделов, но еще существуют направления, которые должны быть автоматизированы.

Известно, что отбор летного и технического персонала происходит, в том числе, по медицинским показателям. Это делается для безопасности самого человека и обеспечения выполнения им поставленной задачи. Также проверяются его знания и опыт.

Предлагается информационная система, которая будет проводить автоматический отбор персонала по необходимым для работы медицинским критериям. Эксплуатация аэрокосмических систем – серьезное мероприятие, связанное со многими факторами риска, поэтому к уровню здоровья сотрудников предъявляются определенные требования.

В систему изначально вводятся требования по медицинским показателям для отбора. Используя такие данные, система будет из имеющейся базы данных кандидатов выбирать таких, которые будут удовлетворять критериям поиска. Люди, которые хотят стать космонавтами (космическими туристами) или работниками наземных служб, должны будут пройти медицинский осмотр в специализированном центре. Результаты этого осмотра будут внесены в предлагаемую систему. Также для сотрудников, работающих на особо ответственных участках могут быть применены специальные датчики, которые позволят определять состояние здоровья человека во время работы [1, 2].

После автоматического отбора анкет потенциальных сотрудников они проходят окончательное утверждение экспертной медицинской комиссией. Специалисты экспертной комиссии могут и сами, при необходимости, произвести поиск кандидатов, либо из требований исключить не особенно значимый пункт, тем самым, выбрать потенциального кандидата, который будет обладать не всеми требованиями. В таком случае оформится специальный документ «вэйвер» (англ. waiver – исключение из правил), в котором медицинская комиссия указывает, что в возникшей ситуации можно отступить от правил, и что это допустимый риск. Каждый «вэйвер» оформляется очень серьезно, готовится полная

справка по выявленному заболеванию, его особенностям, привлекаются специалисты. Выбранные кандидаты смогут перейти на следующие этапы отбора, где будут уже учитываться необходимые знания и опыт.

Используя автоматический поиск потенциальных кандидатов в системе, исчезнет необходимость просматривать все анкеты, тем самым, повысится продуктивность кадровых служб.

Такая система применима, также, для отбора различных специалистов, к здоровью и физической форме которых предъявляются серьезные требования. Применение предлагаемой системы позволит существенно упростить, ускорить процесс подбора космонавтов, летного состава авиации, работников железнодорожного, морского, автомобильного транспорта и обслуживающего технического персонала.

Для того чтобы данные предлагаемой системы были всегда под рукой и можно было осуществить доступ к ней в любой момент с любого терминального устройства, в качестве интерфейса данной системы предлагается использовать кроссплатформенные автономные отказоустойчивые веб-приложения [2, 3].

Список литературы

1. Макарова С.М., Падалко С.Н., Строгонова Л.Б., Терентьев М.Н. Непрерывный круглосуточный медицинский контроль психофизиологического состояния и координат космонавтов с использованием беспроводной сенсорной сети // Вестник московского авиационного института. 2012. Т. 19. № 2. С. 177-181.

2. Гинзбург И.Б., Падалко С.Н., Терентьев М.Н. Система мониторинга крупномасштабных объектов на базе многошлюзовой БСС с автономными отказоустойчивыми веб-клиентами // Электросвязь. 2017. № 9. С. 60-66.

3. Гинзбург И.Б., Падалко С.Н. Автономные веб-приложения для систем обработки космической информации // Труды МАИ. 2015. № 82. С. 38.

## Обеспечение беспроводной передачи данных с испытательных стендов летательных аппаратов на персональный компьютер

Боль А.В., Сазонов В.С.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Терентьев М.Н.
МАИ, Москва
aleksandr-081997@yandex.ru

Цель работы – обеспечение испытательного стенда летательного аппарата (ЛА) беспроводной системой мониторинга [1], для избавления его от проводов. Цель достигается за счёт подключения узлов беспроводной сенсорной сети (БСС) [2] к аналоговым датчикам на элементах конструкции ЛА для снятия первичных показаний и передачи их результатов на персональный компьютер (ПК) по радио или через интерфейс USART для дальнейшей обработки.

Объектом экспериментального исследования является силовой элемент, к которому подключён узел БСС WSN-A2561. Силовой элемент подвергается деформации, вследствие чего на закреплённом аналоговом датчике, на который подан ток, изменяется сопротивление, из-за чего изменяется и падение напряжения. Эта величина поступает на вход аналого-цифрового преобразователя (АЦП) микроконтроллера, преобразующего её в цифровое значение. Измеренные значения передаются для дальнейшей обработки на ПК. Данная задача была разбита на несколько подзадач:

- определение сопротивления нагрузочного резистора для максимального отклика на изменение сопротивления датчика;
- сборка испытательного стенда;
- разработка программного обеспечения (ПО) для узлов БСС;

- разработка ПО для ПК.

Первая подзадача заключается в определении величины нагрузочного резистора для получения максимального отклика измеряемого напряжения на изменение сопротивления датчика. Измеряемое значение напряжения подвержено воздействию случайной погрешности, поэтому, чем больше будет величина изменения напряжения, тем более точное измерение мы получим в условиях действия случайной погрешности. В связи с этим была поставлена задача: максимизировать изменение напряжения в ответ на изменение сопротивления датчика. Результатом является выбор величины нагрузочного резистора равным номинальному сопротивлению датчика.

Вторая подзадача состоит из разработки и изготовления испытательного стенда. Разработана принципиальная схема и собрана цепь, состоящая из силового элемента с закреплённым на нём аналоговым датчиком, нагрузочного резистора и узла БСС WSN-A2561.

Третья подзадача - разработка ПО для работы узлов и совместной работы узлов и компьютера. Для передачи данных между узлами БСС и компьютером разработан протокол двунаправленной передачи данных: с узлов на ПК (показания датчиков) и с ПК на узлы (настройка параметров работы). В обязанности программы на узлах БСС входят: преобразование входного напряжения – десятиразрядного значение, записываемого в два восьмиразрядных регистра микроконтроллера Atmega128 [3], поддержка связи с ПК для передачи данных и вызов процедур обработки полученных с ПК команд.

Четвёртая подзадача - разработка ПО преобразования данных и выполнения расчётов на ПК. Программа на ПК должна осуществлять приём и передачу данных, протоколирование связи, сохранять получаемые с узла БСС данные в файл на компьютере и при необходимости проводить над ними различные расчёты.

Беспроводная сенсорная система мониторинга может быть широко применима в аэрокосмической отрасли, а именно в производстве и испытании ЛА. Подключение узлов БСС к датчикам на испытуемом ЛА позволяет проводить измерения в труднодоступных местах, уменьшает количество используемых проводов, а также позволяет проводить мониторинг ЛА дистанционно и все данные пересылать на ПК для обработки и хранения результатов, полученных во время испытаний.

Список используемой литературы

1. Гинзбург И.Б., Падалко С.Н., Терентьев М.Н. Система мониторинга крупномасштабных объектов на базе многошлюзовой БСС с автономными отказоустойчивыми веб-клиентами. - Электросвязь. 2017. №9. с. 60.

2. Терентьев М.Н. Беспроводные сенсорные сети: Учебное пособие. – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2008. – 96 с.: ил.

3. ATmega128/L Datasheet [Электронный ресурс] / сайт Microchip. — Режим доступа: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/doc2467.pdf

## Информационная поддержка процессов эксплуатации ракетно-космической техники

Глухов В.Д.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Заговорчев В.А.
МАИ, Москва
parmma@yandex.ru

Проведение работ по подготовке к пуску, обслуживанию РКК и устранению неисправностей на нем является крайне трудоемким процессом, который на протяжении всего цикла работ сопровождается большим объемом рабочих документов:

эксплуатационная и ремонтная документация, схемы подключения, программы испытаний, паспорта, формуляры и т.п.

В настоящее время одним из способов оптимизации процессов эксплуатации РКК является внедрение CALS/ИПИ-технологий, использующие единое информационное пространство в пределах всего жизненного цикла и направленные на предоставление всей необходимой информации для решения какой-либо задачи. Основной целью CALS/ИПИ является уменьшение времени исследований, сокращение затрат на разработку, проектирование и производство, упрощение эксплуатации и поддержание изделия в работоспособном состоянии.

Одним из важнейших компонентов CALS является обеспечение персонала эксплуатационной и ремонтной документацией, выполненной в электронном виде. Характерным свойством такой документации является ее интерактивность, т.е. возможность для обслуживающего и ремонтного персонала получать необходимые сведения о процессах и процедурах в форме прямого диалога с компьютером. Для реализации такой возможности, создаются технические руководства ИЭТР (интерактивные электронные технические руководства), представляющие собой эксплуатационную и ремонтную документацию, переведенную в электронный вид, интерактивную графику, трехмерную анимацию и видео.

Целью данной работы является разработка технического задания на ПО управления информационной поддержкой изделия, которое бы учитывало специфику деятельности в ракетно-космической отрасли. В рамках ТЗ были сформулированы цели, состав и структура ПО, требования к нему, а также был разработан в качестве образца фрагмент ИЭТР.

Список используемой литературы:

1. ИПИ технология создания наукоемких изделий / Заковряшин А.И. // Труды МАИ. 2011. № 49. С. 58.

2. Обеспечение качества при технологическом проектировании сложного наукоемкого изделия / Головин Д.Л. // Вестник Московского авиационного института. 2010. Т. 17. № 6. С. 13.

3. Разработка инструкции по эксплуатации образца космического средства в мультимедийном виде / Глухов В.Д., Коробовский А.В. // Гагаринские чтения – 2016: XLII Международная молодёжная научная конференция: Сборник тезисов докладов: В 4 т. М.: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2016.

## Интеллектуальная система самоанализа космического корабля

Деревягин С.А.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Бродский А.В.
МАИ, Москва
Sergderal@yandex.ru

Проблема зависимости космических кораблей или станций во время миссий от поддержки на Земле не нова и требует большого количества экспертов-специалистов и ресурсов. Иногда может потребоваться несколько дней, прежде чем данные будут обработаны, будут приняты решения, и загруженные команды попадут в космический корабль, тогда как на критических этапах миссии, таких как запуск, информация должна обрабатываться, а решения принимаются в течение нескольких секунд. Кроме того, люди не всегда способны распознавать аномальные ситуации, особенно когда они связаны с большим числом переменных. Таким образом, автономные интеллектуальные системы для самоанализа корабля являются очень важной темой исследований в области эксплуатации отдельных космических аппаратов и их группировок [1, 2].

В идеале, космический корабль должен иметь возможность выполнять большинство действий автономно, определяя и анализируя ситуацию, в которой он находится, и в

конечном итоге принимать решения, основанные на этом «самосознании». Решения должны приниматься оперативно и в зависимости от имеющихся различных ресурсов, возможностей оборудования, общего положения корабля и экипажа на борту.

Для решения проблемы описаны два основных подхода: методы на основе моделей и методы, основанные на данных (без моделей).

Методы на основе моделей используют модели аппаратного обеспечения и физических процессов для отслеживания состояний системы и обнаружения отклонений от номинального поведения. При применении их к такой сложной системе, как космический корабль, они могут не воспроизвести все возможные внештатные режимы работы и незапланированные ситуации, для которых точные модели часто отсутствуют.

С другой стороны, основанные на данных подходы, использующие методы интеллектуального анализа данных и машинного обучения, базирующиеся не на физической системе, а на моделях, которые выводятся из телеметрии (например, данные датчика температуры). Этот подход будет включать в себя продвинутые интеллектуальные датчики [3, 4], диагностическое и прогностическое программное обеспечение для датчиков и компонентов, системы рассуждений для менеджеров подсистем и системного уровня, планировщиков обслуживания, а также множество других программных и аппаратных технологий.

Сочетание подходов, основанных на моделях и на данных, позволит обнаружить множество еще только возникающих проблем, пока они не стали причиной какого-то серьезного сбоя, даст больше времени и данных для детального анализа ситуации и поможет более оперативно найти решение возникших проблем.

Список литературы:

1. Капля Е.В., Кузеванов В.С., Шевчук В.П. Моделирование процессов управления в интеллектуальных измерительных системах // М. : Физматлит, 2009. 511 с.

2. Girimonte D., Izzo D. (2007) Artificial Intelligence for Space Applications. In: Schuster A.J. (eds) Intelligent Computing Everywhere. London:Springer-Verlag, 2007. pp 235-253.

3. Гинзбург И.Б., Падалко С.Н., Терентьев М.Н. Система мониторинга крупномасштабных объектов на базе многошлюзовой БСС с автономными отказоустойчивыми веб-клиентами // Электросвязь. 2017. № 9. С. 60-66.

4. Гинзбург И.Б., Падалко С.Н., Терентьев М.Н. Концепция систем дистанционного мониторинга процессов производства и испытаний аэрокосмической техники на основе многошлюзовой беспроводной сенсорной сети с автономным веб-приложением // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. № 4. С. 58-61.

## Перспективы увеличения интенсивности использования космодромов посредством оптимизации обслуживания рельсовых средств доставки

Драгун Ю.В.
Научный руководитель — к.т.н. Терентьев М.Н.
МАИ, Москва
dragun97yu@gmail.com

Увеличение интенсивности использования космодромов требует ускорения обслуживания всех технических средств, вовлечённых в процесс подготовки старта космического корабля. Одним из таких технических средств являются рельсовые тележки доставки к стартовому столу. Время обслуживания тележек может быть сокращено, если заниматься замерами параметров, влияющих на надёжность тележки, например, состояние колёсных пар прямо на ходу тележки. Своевременное измерение позволит точнее строить планы обслуживания, планы доставки расходных материалов, тем самым, уменьшая время подготовки к полёту в целом.

Сейчас обнаружение неисправностей представляет несколько несвязанных процедур, происходящих в разное время, и требующих, в основном, участия человека. Геометрические параметры колеса и оси выявляются при техническом осмотре осмотрщиками вагонов на станциях. [3] При прохождении составами участков, оборудованных комплексами технических средств мониторинга, диагностируется перегрев узлов, заклинивание колёс и негабаритное волочение частей состава [4].

Технической базой может являться система узлов малого энергопотребления, оборудованных датчиками, объединённых в беспроводную сенсорную сеть [1, 2]. Система предполагает измерение параметров колёс на колёсной паре, оси колёсной пары, температуры букс. Опасность движению представляют ползуны, навары, выщербины, трещины. Выявление заключается в измерении геометрических параметров колёс. Так как изменения этих параметров в пределах пары миллиметров существенным образом влияют на безопасность движения, требуется использование высокоточных измерителей. Существующие методы требуют механического контакта с поверхностью колеса для точного определения всех параметров и полной остановки пары. [3] По ширине колеса и напротив середины оси либо под днищем вагона, либо на раме предлагается расположить оптические датчики расстояния, которые будут измерять расстояние от места закрепления до поверхности колеса. Также требуется установка акселерометров для учёта вибраций вагона, если вибрации будут доставлять значительную погрешность в измерении и не иметь периодической природы возникновения, как, например, при прохождении рельсового стыка. С учётом вышесказанного можно принять, что при идеальном состоянии колеса расстояние между замеряемой поверхностью и датчиком будет оставаться неизменным. Количество измерителей и расстояние между ними выбирается таким образом, чтобы точность измерения соответствовала точности измерения существующими методами - не менее ±0,2 мм. Также комплекс измерителей включает в себя температурные датчики для определения температуры воздуха и инфракрасные термодатчики, направленные на буксы. Использование инфракрасных термодатчиков обусловлено тем, что определение перегретости букс основывается на том, что перегретые буксы будут излучать волны инфракрасного диапазона с мощностью, не соответствующей нормальному нагреву букс при текущих внешних условиях. [5] Также информация о температуре окружающей среды может быть важна и для измерителей расстояния, чтобы термическое расширение металла не вызывало ложного определения неисправности.

По сравнению с текущими средствами диагностики предлагаемый метод требует меньшего времени простоя рельсового средства передвижения, однако может требовать большей точности инструментов в связи с тем, что положение диагностических узлов может время от времени меняться. Также сложность представляет осмотр колёс сбоку - ведение такого вида диагностики автоматически с корпуса транспортного средства может потребовать негабаритных решений. Тем не менее, использование такой системы для замены части диагностических операций, доселе проводившихся непосредственно человеком, может сократить технический осмотр в целом.

Таким образом, предложенный комплекс средств посредством увеличения автоматизации мероприятий, сопутствующих подготовке к полёту, может позволить сократить затраты на обслуживание и, соответственно, стоимость полёта в целом.

Список литературы

1. Терентьев М.Н. Беспроводные сенсорные сети. Учебное пособие. — М.: Издательство МАИ, 2007.

2. IEEE Standard for Local for Local and metropolitan area networks - Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs), 2011

3. Инструкция по техническому обслуживанию вагонов в эксплуатации (инструкция осмотрщику вагонов)

4. Швалов Д.В., Шаповалов В.В. Системы диагностики подвижного состава: Учебник для техникумов и колледжей ж.-д. транспорта / Под ред. Д.В. Шаповалова - М. : Маршрут, 2005. - 268 с.

5. А.А.Миронов, В.Л. Образцов, А.Э. Павлюков. Теория и практика бесконтактного теплового контроля буксовых узлов в поездах. - Екатеринбург: РПФ «Ассорти», 2012. -396 с.

## Особенности пожарной защиты технически сложных объектов

Дудин М.А.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Графкина М.В.
Московский политехнический университет, Москва
marina.grafkina@rambler.ru

Анализ пожарной защиты технически сложных объектов, к которым относятся объекты космической инфраструктуры, метрополитен, опасные производственные объекты и др. привел к выводу, что несмотря на постоянное повышение пожарной безопасности разрабатываемого оборудования и конструкций, совершенствование методов и средств профилактики возгорания, раннего обнаружения и оперативного пожаротушения полностью исключить возгорания невозможно. Отсюда проблема повышения уровня пожарной защиты технически сложных объектов остается по прежнему актуальной.

Анализ особенностей пожарной опасности технически сложных объектов показал, что они характеризуется наличием значительного количества горючих материалов в оборудовании, числа кабельных сетей и электрооборудования, находящегося под напряжением. Для обеспечения пожарной защиты сложных объектов используют в основном три уровня безопасности (на примере космической отрасли): 1 – высокий уровень стандартизации и технических условий по обеспечению пожарной безопасности, используемых при разработке любого оборудования и конструкций; 2 – специальные средства обеспечения пожаробезопасности (системы аварийной защиты, средства контроля и диагностики и т.п.), обеспечивающие пожарную безопасность объектов в штатных и нештатных ситуациях; 3 – активные средства, т.е. средства пожарообнаружения и подавления пожара. устройства автоматической пожарной сигнализации и дымоудаления и устройства автоматического пожаротушения.

Практический опыт работы по обслуживанию систем пожарной сигнализации, позволил выделить особенности работы пожарных извещателей на технически сложных объектах (на примере метрополитена). Особенности характеризуются следующими показателями - значительный уровень электромагнитных полей, обусловленный наличием кабельных сетей и электрооборудования; наличие токопроводящей пыли; значительная концентрация в воздухе помещений (машинный зал, венткамера, вентшахта, коллектор и др.) технологической пыли, значительные скорости воздушных потоков до 5 м/с. Установлено, что количество ложных срабатываний пожарных извещателей увеличивается с ростом концентрации технологической пыли в производственных помещениях.

Поэтому необходимо дальнейшее совершенствование системы технических и организационных мероприятий по выбору, размещению и обслуживанию пожарных извещателей. При выборе пожарных извещателей следует учитывать их устойчивость к указанным факторам внешнего воздействия, что снижает вероятность ложных срабатываний. Например, извещатели серии ECO 1000 имеют следующие основные характеристики: алгоритм компенсации запыления; инерционность срабатывания дымового канала – 10 сек; порог срабатывания при медленном повышении температур – 58Со; помехоустойчивость к электромагнитному полю – 3 степени жесткости по ГОСТ Р 53325-2009; допустимая скорость воздушного потока до 20 м/сек и др. Среди технических

мероприятий по исключению ложных срабатываний также необходимо предусмотреть выявление и подавление источников технологического пылевыделения.

В организационных мероприятий следует предусмотреть изменение регламента обслуживания извещателей для предотвращения ложного срабатывания в помещениях с повышенной концентрацией технологической пыли, например, чаще чем установлено в настоящее время для тяговых подстанций – 2 часа 1 раз в месяц.

Предложенные решения применимы на третьем уровне повышения пожарной безопасности технически сложных объектов и позволяют снизить вероятность ложных срабатываний пожарных извещателей, повысить их надежность и устойчивость к факторам внешней среды.

## Исследования влияния радиационных поясов Земли на космические аппараты и пилотируемые корабли

Дякин Д.И.
МАИ, Москва
dnk11gusenicy@yandex.ru

Для обеспечения безопасности экипажа и долгосрочной работы космических аппаратов и кораблей (КА, КК), необходимо знать в каких именно условиях они находятся. Первой угрозой на пути в открытый космос становятся радиационные пояса Земли (РПЗ). Актуальность проблемы заключается в том, что все больше и больше КА и космического мусора находится на различных орбитах Земли, а значит меньше остается безопасных участков для их стабильного функционирования. Именно поэтому следует проводить исследования о распределении заряженных частиц и их воздействии на бортовую аппаратуру КА, КК в других зонах РПЗ. Необходимо моделирование и оценка этих зон.

Первой задачей является изучение РПЗ, их состава, природы происхождения, кинематики и плотности среды. Среди частиц РПЗ существуют: электроны и ионы плазмы солнечного ветра, электроны и протоны, в том числе образующиеся в ядерных реакциях при взаимодействии частиц галактических космических лучей с атмосферой. РПЗ имеют форму тора и в основном состоят из электронов и протонов (ядра и ионы гелия, кислорода и других элементов) с энергией от сотни кэВ до нескольких сотен МэВ. Они заполняют практически всю область дипольного и квазидипольного магнитного поля в магнитосфере Земли. Заряженные частицы не слишком большой энергии могут длительное время удерживаться на замкнутых траекториях (геомагнитная ловушка).

Вторая задача подразумевает выделение зон с наибольшей плотностью заряженных частиц, а также зон преимущественно с частицами больших энергий. Из-за положения магнитного экватора, ось которого отклонена от оси вращения Земли на 13,4○, появляется Бразильская аномалия. В этой области (противоположная точка от острова Гуам находится в глубине Земли, примерно в 2640 км от Южной Америки) в этой области величина магнитного поля на уровне моря такая, как на высоте ~ 1000 км вне аномалий. Поскольку Бразильская аномалия отрицательна и располагается на низких широтах, в этом районе происходит не только опускание зеркальных точек частиц, но и провисание дрейфовых оболочек к Земле. Внутренний радиационный пояс Земли начинается на высоте примерно 500 км над западным и 1500 км над восточным полушарием Земли. Самая большая концентрация частиц этого пояса — его ядро — находится на высотном промежутке 2000-3000 километров. Верхняя граница этого пояса достигает 3000-4000 километров над поверхностью Земли. Внутренний пояс преимущественно состоит из положительно заряженных протонов, обладающих очень большой энергией — порядка 100 МэВ. Круговые орбиты с высотой 2500 км - это средняя величина на выбранном. На основании моделирования процессов и анализа полученных данных с помощью программного модуля

COSRAD делаем вывод, что данная орбита пересекает или близка ко всем наиболее опасным участкам внутреннего РПЗ. Функционирование на ней (или пересечение участков) чревато для КА, КК частыми сбоями и даже полным отказом радиоэлектронной аппаратуры. Именно эта область является наиболее опасной.

## Автоматизированная система тестирования персонала для контроля навыков безопасной эксплуатации аэрокосмических систем

Зотов А.А.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Бродский А.В.
МАИ, Москва
alalzotov@ya.ru

Целью работы является разработка механизма и инструмента оценки уровня персонала в аэрокосмической области. В данной работе описывается автоматизированная система тестирования персонала.

Автоматизированная система тестирования позволит определить общий уровень знаний респондента, а также риски создания аварийных ситуаций с участием респондента [1].

Множество вопросов позволит получать независимую оценку для каждого респондента. Вопросы классифицированы по областям нормативных документов безопасной эксплуатации аэрокосмических систем.

Эксперт системы будет иметь возможность добавлять в систему новые вопросы с вариантами возможных ответов. Каждый вопрос будет иметь один правильный из возможных четырех вариантов ответа. Так как в системе вопросы классифицированы по областям аэрокосмической сферы, система обеспечит возможность производить тестирование на знание узкоспециализированных разделов.

Система будет генерировать уникальные тесты, содержащие шестьдесят вопросов, в зависимости от целей тестирования. Уникальность тестов позволит получать независимую оценку знаний респондентов. После сбора и обработки ответов, система сравнит ответы респондентов, и выдаст результат. Результатом оценки респондента будет являться:

1. Сертификат, определяющий оценку знаний в виде процента числа правильных ответов от количества всех вопросов.
2. Приложение к Сертификату, содержащее список областей, рекомендуемых к более детальному изучению.

Система будет представлена в виде веб-приложения [2], а так же иметь интерфейсы для Android и IOS устройств. Возможность проходить тестирование на Android и IOS устройств предоставляет универсальность в выборе места для тестирования, а также позволит проводить тестирования респондентов, находящихся в различных городах и странах одновременно.

Функционал системы будет представлен в интерфейсах эксперта, администратора, респондента. Интерфейс эксперта позволит дополнять базу новыми вопросами, а также просматривать отчеты, отображающие результаты тестирования респондентов. Интерфейс администратора обеспечит администрирование системы. Интерфейс респондента обеспечит тестирование респондентов.

Преимуществами предложенной системы являются: мобильность, автоматическая проверка тестов, возможность генерации узкоспециализированных тестов.

В дальнейшем данная система может использоваться не только для тестирования знаний в области безопасной эксплуатации аэрокосмических систем. Совершенно любой человек из любой точки мира, сможет проверить свои знания в определённой сфере и получить независимую оценку.

Список литературы

1. Recruitment and Selection: A Framework for Success. 2009. pp. 50-66.
2. Гинзбург И.Б. Состав и архитектура взаимодействия модулей функционально насыщенного автономного веб-приложения для распределенных систем информационной поддержки различных этапов жизненного цикла аэрокосмической техники // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. № 6. С. 130-133.

## Анализ экологической эффективности и безопасности предприятия на примере аэропорта Шереметьево (АО «МАШ»)

Игнатенко П.П.
Научный руководитель — доцент, к.б.н. Мессинева Е.М.
МАИ, Москва
pollianna-1997@mail.ru

Одним из важнейших документов, входящих в серию ISO 14000, признается стандарт ISO 14031 «Оценивание экологической эффективности, общие требования». Согласно ISO 14001 экологическая эффективность – измеряемые результаты деятельности системы экологического менеджмента, связанные с контролем предприятием уровня своего воздействия на окружающую среду. Увеличение уровня экологической эффективности предприятия может быть обеспечено эффективным управлением теми элементами деятельности предприятия, которые оказывают наиболее значительное воздействие на окружающую среду.

Оценивание экологической эффективности (ОЭЭ) представляет собой внутренний процесс и инструмент управления, предназначенный для обеспечения руководства предприятия информацией о том, насколько экологическая эффективность организации соответствует заданным критериям.

Авиационная отрасль является существенным источником негативного воздействия на окружающую природную среду и здоровье человека. Относительная доля авиации в суммарном антропогенном загрязнении составляет приблизительно 3,5 %. Так как авиатранспорт источник непосредственного загрязнения окружающей среды, то естественно существенное локальное загрязнение создается в зоне аэропортов и воздушных магистралей — по трассам полета самолетов[1].

В данной работе оценка экологической эффективности и безопасности аэропорта Шереметьево (АО МАШ) проводилась на основе годовых отчётов предприятия за 2012-2015гг. Для оценки были выбраны следующие параметры:

- Объём выбросов веществ загрязняющих атмосферный воздух
- Объём сбросов загрязняющих веществ в водные объекты
- Потребление воды
- Объём образования отходов
- Потребление газа для котельных
- Потребление электроэнергии
- Расходы на природоохранные мероприятия

За 2012 год объём выбросов в атмосферный воздух составил 2121,6 тонн, а к 2015 уже 3218,86 тонн, но эти значения не превышают разращенный объём выбросов (3239,82 тонн). Такое резкое увеличение выбросов объясняется открытием нового терминала, что привело к увеличению числа рейсов. Основными загрязнителями являются диоксид серы, оксиды углерода, оксиды азота.

Показатель эффективности объёмов сбросов загрязняющих веществ в водные объекты на 2015 год был улучшен на 19,5% по сравнению с 2012 годом. Это связано с улучшением системы очистки. Основными загрязнителями являются хлориды и взвешенные вещества.

Не смотря на открытие терминала в 2012 году, потребление воды удалось вернуть к показателям 2011 года. Таким образом, он составил 1437,5 тыс. м3 в год, вместо 1671,3 тыс. м3 в год.

Объём образования отходов увеличился на 49% и составил 15,5 тыс. тонн на 2015 год, что связано с проведением работ по реконструкции объектов. Тем не менее, на территории аэропорта установлены 138 площадок для хранения отходов.

Потребление газа в котельных снизилось с 13715.9 до 27782.1 тыс. куб. м. в год, что соответствует уменьшению использования топлива на 12,4%. Это может быть связано с установкой преобразователей частоты на насосном оборудовании в котельной. Стоит отметить, что предприятие не использовало мазут (является резервным топливом) в 2014-2015 гг.

Потребление электроэнергии на период с 2012 по 2015 год упало практически в 2 раза (с 192483,3 до 104162,3 тыс. кВт/ч). Это связано с проведением мероприятий по уменьшению потребления электроэнергии (например, замена лампочек на энергосберегающие), а так же с разделением на потребление электричества АО «МАШ» и арендаторов, а так же субарендаторов.

Расходы на природоохранные мероприятия за рассматриваемый период возросли более чем в два раза (с 41415,6 тыс. руб. до 108138,1 тыс. руб.). Так же уменьшилась плата за сверхнормативные сбросы и выбросы вредных веществ в окружающую среду на 19,7% преимущественно за счёт реализации мероприятий в области охраны окружающей среды.

В заключении можно сделать вывод, что, несмотря на расширения организации АО «МАШ» успешно справляется с поставленными задачами по поддержанию экологической эффективности предприятия.

Использованные материалы:

1. Булычев С.Н., Мануйлова Н.Б., Мессинева Е.М., Горбачев С.И. Комплексный анализ химических воздействий на окружающую среду, возникающих при эксплуатации авиационной техники, и возможных путей решения данной проблемы // Экология промышленного производства. 2016. №4. С. 62-66

## Анализ источников излучения, применяемых при эксплуатации термобарокамеры для отработки КА

Карпов С.В.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Палешкин А.В.
МАИ, Москва
goalfish@yandex.ru

Одну из важнейших ролей в конструкции тепловакуумных испытательных стендов играет имитатор солнечного излучения (ИСИ). В свою очередь, одним из ключевых элементов ИСИ являются источники излучения, пригодность которых определяется их спектральными, энергетическими и эксплуатационными характеристиками. Нет источников, которые в полной мере позволяли бы воспроизводить солнечное излучение во всех областях спектра, в которых Солнце оказывает прямое и косвенное воздействие на тепловое состояние космического аппарата (КА). Так, например, коротковолновое излучение Солнца ($\lambda \leq 0{,}38$ мкм), оказывающее косвенное влияние на тепловой режим КА, может воспроизводиться с помощью газоразрядных ламп высокого и сверхвысокого давления, водородно-дуговых ламп, плазмотронов, специальных трубок мягкого рентгеновского излучения, а излучение в видимой и инфракрасной областях спектра чаще всего воспроизводится с помощью дуговых ламп сверхвысокого давления с ксеноновым наполнением. При этом характерной особенностью спектра излучения такой лампы является наличие сильной полосы излучения в диапазоне длин волны (0,8-1,1)мкм. Поэтому при

проведении различных экспериментальных исследований, связанных с тепловакуумными, вакуумно-температурными, и комплексными электрическими испытаниями космических аппаратов или их отдельных фрагментов проявляется все больший интерес к упрощенным средствам экспериментального моделирования внешних тепловых нагрузок на поверхности испытуемых объектов. Это связано в основном со следующими обстоятельствами. Во-первых, использование имеющихся тепловакуумных установок, оснащенных имитаторами солнечного излучения, во многих случаях является нецелесообразным по экономическим и организационным соображениям. Во-вторых, при испытаниях аппаратов, изменяющих в условиях штатной эксплуатации свою ориентацию относительно источников внешних тепловых потоков, возникает необходимость в использовании упрощенных средств имитации внешних тепловых потоков даже при наличии в составе установки имитатора солнечного излучения. Кроме того следует отметить то, что при использовании имеющихся имитаторов солнечного излучения часто возникают проблемы, обусловленные различным поведением радиационнно-оптических покрытий поверхности КА по отношению к излучению Солнца и излучению солнечного имитатора. Из упрощенных средств наиболее привлекательными с экономической точки зрения, а также с точки зрения эксплуатации представляются системы устанавливаемых вокруг рабочей зоны излучателей, желательно локальных – линейчатых или точечных, чтобы не ухудшать качество моделирования в экспериментальной установке поглощательных свойств космического пространства. В связи с этим наблюдается возрастающий интерес к термобарокамерам, оснащенным термоэкранами и системами галогенных ламп накаливания.

## Особенности конструкции и технической эксплуатации взлетно-посадочных устройств самолета МиГ-29К

Картавский Д.В.
Научный руководитель — доцент, к.п.н. Дулин В.В.
ВУНЦ ВВС «ВВА», Воронеж
sokolovskij.danya@mail.ru

«Особенности конструкции и технической эксплуатации взлетно-посадочных устройств самолета МиГ-29К»

Двухместный многофункциональный истребитель корабельного базирования МиГ-29К предназначен для уничтожения воздушных целей, надводных кораблей, береговых объектов противника в операциях, проводимых флотом.

Самолет способен решать следующие задачи:

- перехват и атака воздушных целей;
- ведение воздушного боя;
- поражение надводных и наземных целей.

Самолет осуществляет посадку в автоматическом, директорном и ручном режимах управления. Взлет на корабеле укороченный, с использованием трамплина. Посадка на палубу осуществляется с использованием аэрофинишера.

Исходя из условий эксплуатации, можно выделить особенности конструкции и технической эксплуатации взлетно-посадочных устройств (ВПУ).

Особенности конструкции ВПУ самолета Миг-29К:

- силовая система ВПУ усилена в сравнении с летательным аппаратом (ЛА) наземного базирования;
- наличие тормозного ГАКа;
- усиленные пневматики колес;
- применение усиленных газожидкостных амортизаторов.

Особенности технической эксплуатации ВПУ Миг-29К:

- небезопасные условия работы специалистов инженерно авиационной службы (ИАС);
- сложные условия для обеспечения сохранности и поддержания в исправном состоянии средств технического обслуживания.

Нами предлагаются следующие мероприятия:

- увеличение срока автономного обслуживания путем адаптирования корабельных систем под современные типы ЛА;
- внедрение в эксплуатацию новейших средств неразрушающего контроля;
- обеспечение ИАС средствами защиты от внешних факторов.

Нами рассматриваются следующие возможности совершенствования технической эксплуатации:

- использование программного обеспечения диагностики и средств генерации тестовых режимов;
- использование многоканальных средств преобразования сигналов и средств ввода информации от средств неразрушающего контроля.

## Использование воды для защиты космических объектов от высокоскоростных микрочастиц

Комолова Н.С., Кулагина А.М.
Научный руководитель — профессор, д.б.н. Надежкина Е.В.
МАИ, Москва
natalyfox.1994@mail.ru

В настоящее время, наряду с увеличением времени пребывания космических аппаратов на орбите, отмечается заметное увеличение количества космического мусора, и, в целом, рост уровня загрязнения околоземного пространства. Как следствие, средства защиты космических апператов от механических повреждений требуют совершенствования и доработок. Скорость микрометеоритов сопоставима со скоростью КА и составляет ~10 км/с. Защита КА и ОС от микрочастиц осуществляется экранами, выполненными из металла или композитных материалов, и включающих несколько различных по физико-механическим свойствам слоев. При столкновении с экраном энергия высокоскоростной микрочастицы в большей степени расходуется на механическую деформацию покрытия. Крупные орбитальные станции наиболее подвержены повреждениям высокоскоростными частицами ввиду долгосрочного пребывания в космическом пространстве. К тому же вес их защитного покрытия достаточно велик и доставляется с Земли. Следовательно, использование воды, имеющейся на борту ОС в качестве защитного покрытия весьма целесообразно. Так же данное покрытие может служить «внешним» хранилищем водных ресурсов.

Замерзшая вода может быть наполнителем одного из слоев комплексной защиты, в состав которого нужно включить пористую гидрофильную основу. Она необходима для облегчения технологии формирования покрытия и увеличения его пластичности в замерзшем состоянии. Для предотвращения испарения льда в вакууме снаружи нужен защитный слой.

Замерзшая жидкость по сравнению с твердым защитным покрытием имеет малую прочность. Высокоскоростная частица, движущаяся со скоростью ~1000 м/с практически беспрепятственно проникает в толщу льда (предположим, что его механического разрушения не происходит), расходуя кинетическую энергию на плавление и испарение жидкости в объеме канала, проделанного ей. Так осуществляется процесс торможения частицы во льду.

При движении микрочастица «прожигает» во льду канал с сечением равным миделеву сечению самой частицы, потому что скорость тепловых процессов в поперечном направлении меньше скорости движения частиц в продольном направлении. При этом перед сверхзвуковой частицей должна сформироваться паровая прослойка со стационарными перепадами температуры и уплотнения, так как движение сверхзвуковой микрочастицы во льду будет подчиняться общим принципам сверхзвукового движения тел в сплошной среде. Плавление льда и испарение жидкости перед микрочастицей в данном случае произойдет из-за температурного скачка, причем испарение воды будет происходить благодаря давлению, реализуемого за скачком уплотнения.

Торможение микрочастицы будет производиться эффективно при условии, что удельная теплота испарения воды велика. Рассмотрим элементарную оценку: допустим, масса микрочастицы m = 1 г; площадь миделя микрочастицы Я = 1 см2. Такая частица, при движении со скоростью V ≈7 км/с сможет проникнуть в толщу водяного льда всего лишь на ≈ 10 см (примем удельную теплоту фазовых переходов «лед – вода – пар» примерно равной 2000 кДж/кг). Глубина пробоя перспективных комплексных защитных покрытий (включающих слои металла) примерно совпадает с баллистическим пределом защиты, при этом масса единицы площади многослойного металлического покрытия (особенно с учетом термомостов) больше, чем у ледяного покрытия.

Значит, покрытие из водяного льда может являться перспективным эффективным средством защиты космических аппаратов от высокоскоростных микрочастиц за счет большой теплоты испарения воды.

## Модернизация системы управления центробежного стенда

Корябочкина А.А.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Заговорчев В.А.
МАИ, Москва
koryabochkinaa@gmail.com

Наземная отработка автоматических космических аппаратов требует проверки конструкции на нагрузки, которые в земных условиях моделировать достаточно сложно. Наиболее нагруженные участки полета КА – этап вывода на орбиту и этап входа в атмосферу планеты – можно имитировать на центробежных стендах. При моделировании входа спускаемого аппарата в атмосферу планет необходимо учитывать нескольких факторов: меняющаяся осевая перегрузка, знакопеременная перегрузка в перпендикулярном направлении, аэродинамическая нагрузка. Для реализации одновременного воздействия на КА этих факторов используется специальный стенд, который позволяет воспроизводить при испытаниях образцов ракетно-космической техники моделируемый закон изменения перегрузок во времени.

Предлагается провести модернизацию морального и физически устаревшего оборудования стенда, которая позволит решить ряд задач:

- Повышение отказоустойчивости всего комплекса;
- Создание на базе микропроцессорной техники системы управления центробежного стенда с возможностью управления в автоматическом и ручном режиме;
- Повышение надежности и экономичности работы оборудования за счет реализации передовых технологий контроля и управления;
- Повышение коэффициента готовности оборудования;
- Уменьшение вероятности ошибочных действий персонала;
- Увеличение периодичности технологического оборудования и ремонта.

Если оснастить стенд цифровой системой управления, то он позволит в полном объеме и с высоким качеством и безопасностью отработать системы перспективных КА. На данный

момент в пультовой комнате располагаются электрические шкафы с аналоговой системой управления. С их помощью оператор управляет центробежным стендом – вручную меняет режимы нагружения, моделируя полет КА, но число вариантов нагружения ограничено, и операции не сохраняются. Для управления приводом центробежного стенда предлагается многофункциональная, свободно программируемая автоматизированная система управления, которая предполагает выполнение следующих функций:

- Сбор и первичная обработка информации;
- Выдача управляющих воздействий;
- Визуализация;
- Автоматическое управление параметрами технологического процесса;
- Защита, сигнализация и регистрация аварийных ситуаций;
- Регистрация контролируемых параметров, событий, действий оператора;
- Обмен данными с локальными системами управления.

Предложенные конструктивные решения по демонтированию морально устаревшего электрооборудования на современное позволит сохранить все заданные характеристики, а также облегчить процесс проведения испытаний на стенде.

## Анализ влияния авиационного транспорта на состояние атмосферы

Ларина К.А., Судуков А.Э.
Научный руководитель — доцент, к.б.н. Мессинева Е.М.
МАИ, Москва
kira171095@mail.ru

В настоящее время вклад транспортных средств в загрязнение биосферы невозможно недооценить, при этом с каждым годом возрастает относительный вклад авиации. Связано это с постоянным возрастанием значимости в коммуникационных связях человечества.

Внедрение в эксплуатацию различных типов авиационных газотурбинных двигателей для самолетов и вертолетов, комбинированных ВРД для летательных аппаратов аэрокосмического назначения вызвало ряд существенных экологических проблем. Возникла реальная угроза развития «парникового» эффекта, разрушения озонового слоя Земли, накопления канцерогенных и мутагенных продуктов, выпадение кислотных дождей. В работе [1] подробно показано, что авиационное топливо и образующаяся из него сажа могут оказывать канцерогенное действие на живые организмы. Происходит накопление вредных веществ в атмосфере, воде и почве, что детально описано в работах [2], [3].

Выпуск загрязняющих веществ происходит в слоях атмосферы, особенно чувствительных к различным возмущениям - верхней тропосфере и нижней стратосфере, там, где зарождаются погодные процессы и где в значительном количестве содержится парниковый газ озон. Локальное загрязнение создается в зоне аэропортов и воздушных магистралей - по трассам полета самолетов. Полеты дозвуковых самолетов происходят в основном в верхней тропосфере или нижней стратосфере на высотах 9-13 км, а сверхзвуковых - в стратосфере на высотах 15-25 км. Полеты сверхзвуковых самолетов приводят к уменьшению концентрации озона в стратосфере [4]. Основной причиной этого эффекта является наличие в выбросах двигателей этих аппаратов оксидов NOx, HOx и их соединений. Полеты дозвуковых самолетов оказывают влияние на изменение концентрации O3 и NO в тропосфере, на плотность облаков в верхней тропосфере, на стратосферный аэрозольный слой и на стратосферно-тропосферный обмен.

Основные выбросы, связанные с эксплуатацией воздушных судов:

- Оксиды азота (NOx);
- Монооксид углерода (CO);

- Несгоревшие углеводороды (CH4);
- Двуокись серы (SO2);
- Тонкая твердая фракция (PM10 и PM2.5);

NOx является самым распространенным и считается самым значительным загрязнителем с точки зрения качества воздуха.

На режиме малого газа коэффициент полноты сгорания топлива составляет примерно 99% и выбросы HC и CO являются максимальными. На режимах взлета, набора высоты и крейсерского полета коэффициент полноты сгорания составляет более 99,9%, и величина выбросов HC и CO является очень малой. Выбросы NOx и дымление двигателей ведут себя противоположно: их максимум образуется при наибольшей тяге двигателя.

Динамика развития возмущенной самолетом области атмосферы определяется целым комплексом гидродинамических и фотохимических процессов. На начальном этапе происходит смешение истекающих из сопла двигателя газов со спутным потоком атмосферного воздуха. Одновременно с этим происходит эволюция вихревых структур, сходящих с концов крыльев, которые на некотором расстоянии от среза сопла начинают взаимодействовать с потоком, образовавшимся в результате смешения продуктов сгорания с окружающим воздухом. На следующей стадии происходит распад вихревого следа на отдельные крупномасштабные образования кольцевой формы, которые по истечении определенного времени смешиваются с невозмущенной атмосферой [4]. Т.е. влияние авиации на атмосферу происходит через комплекс взаимосвязанных процессов.

Как и любой другой общественный транспорт, который опирается на ресурсы планеты, авиация не может (в ее нынешнем виде) считаться устойчивой в долгосрочной перспективе. Из-за ограниченности ресурсов, на которые она опирается, более реалистично думать о том, как улучшить стабильность воздушного транспорта, а также добиться развития и применения инновационных технологий в конструировании двигателей для воздушного транспорта.

1. Цит. по: Булычев С.Н., Мессинева Е.М., Фетисов А.Г. Исследование потенциальной канцерогенной опасности авиационного транспорта//Экология промышленного производства: научн.журнал. № 3. М.: Компас, 2014. С. 47-49.
2. Цит. по: Булычев С.Н., Мануйлова Н.Б, Мессинева Е.М., Горбачев С.И. Комплексный анализ химических воздействий на окружающую среду, возникающих при эксплуатации авиационной техники, и возможных путей решения данной проблемы (обзор)//Экология промышленного производства: научн.журнал. № 4. М.: Компас, 2016. С.62-66.
3. Цит. по: Мессинева Е.М., Мануйлова Н.Б, Булычев С.Н., Горбачев С.И. Проблемы и особенности воздействия авиационных горюче-смазочных материалов на окружающую среду//Журнал технических исследований. 2016. Т.2. №1. С. 2.
4. Яновский Л.С., Харин А.А., Шевченко И.В., Дмитренко В.П. Авиационная экология. Воздействие авиационных горюче-смазочных материалов на окружающую среду: учеб. пособие. М.: ИНФРА-М, 2017. С. 9.

## Система автоматизированного контроля качества сборки изделий ракетно-космической техники

Лаценова Л.Р.
Научный руководитель — Власов И.В.
МАИ, Москва
molokoskislo@mail.ru

Одной из главных задач при создании, испытании и эксплуатации ракетной техники является оценка и контроль показателей технического состояния, надежности и

безопасности изделий ракетно-космической техники (РКТ). В настоящее время расчет значений показателей производится с использованием специальных информационно-аналитических систем (ИАС), предназначенных для повышения эффективности эксплуатации и надежности изделий РКТ. Такие системы совмещают в себе функции сбора, обработки и хранения информации между системой расчета надежности и системой эксплуатации. При автоматизации сбора первичной информации на местах эксплуатации техники, информация, используемая в ходе повседневной служебной деятельности, доступна в базах данных ИАС для автоматического анализа.

В задачи контроля технического состояния изделия РКТ также входит поддержание на необходимом уровне качества сборочных работ. Любые ошибки, допущенные при неправильной сборке элементов конструкции, могут привести к отказу изделия во время эксплуатации.

Так как на сегодняшний день многократно возросли вычислительные мощности, электронно-вычислительные устройства продолжают уменьшаться в габаритах, появляются новые методы обработки неформализованной информации, стало возможным создать систему автоматизированного контроля качества сборки изделий ракетно-космической техники непосредственно на полигоне перед стартом.

Для повышения качества и надежности сборки изделия предлагается использовать на узлах (блоках, агрегатах) наклейки с двухмерными штрих-кодами, содержащими идентифицирующие их конструкторско-технологические характеристики и устанавливаемые специально ориентированным способом, что позволяет автоматизировать процесс контроля сборки изделия РКТ в монтажно-испытательном комплексе (МИК).

Принцип работы:

1) С помощью специальной компьютерной программы, связанной с базой данных сборочных компонентов изделия РКТ завода-изготовителя, создается компьютерный макет двумерного маркера для каждой сборочной единицы.

2) На любом принтере печатаются клейкий маркер со штрих-кодом (с использованием обычной самоклеющейся бумаги) и устанавливается специальным (ориентированным) образом на все необходимые узлы и блоки изделия;

3) Перед началом эксплуатации, после сборки в МИК, все наклейки сканируются специальным сканером, считывающим не только содержание штрих-кода наклеек, но и их ориентацию в пространстве;

4) Информация из штрих-кода маркеров, а также об их взаимном пространственном, положении заносится в базу данных сборочных компонентов МИК. После окончания сборки изделия выполняется верификация обоих сборочных баз данных (завода-изготовителя и МИК). В случае их идентичности делается вывод о корректности установки сборочных единиц изделия РКТ.

Двухмерные штрих-коды позволяют закодировать больший объем информации, чем одномерные (в линейном штрих – коде можно закодировать не более 256 символов), что является их решающим преимуществом. В этих штрих-кодах будет содержаться вся информация по тому блоку или узлу, на который штрих-код и был помещен (включая сведения о специалистах, ответственных за сборку этой части изделия). Для корректного считывания информации, штрих-код должен быть размещен в определенном положении.

Ввод данных с использованием меток двумерных штрих-кодов осуществляется с помощью специальных сканеров двумерных штрих-кодов, используемых специальной программой декодирования информации. На сегодняшний день существует множество промышленных интеллектуальных сканеров штрих-кодов, предназначенные для использования в сложных условиях. Они хорошо переносят вибрацию, многократные удары и падения на бетонную поверхность, некоторые модели переносят и пятидесятиградусные морозы. В промышленности, где пыль или влага, температура может достигать 50оС. Иногда требуется отсканировать штрих-код с расстояния 10 метров, и при этом сделать это точно,

быстро и безошибочно – в этом отношении современные промышленные сканеры незаменимы.

После сборки, с помощью специальных сканеров, включающих подсистему контроля его положения в пространстве, сканируется содержание и положение наклеек с автоматическим внесением информации в базу данных с последующей проверкой ее полноты и корректности.

Подобная система автоматизированного контроля качества сборки изделия РКТ с применением двухмерных штрих-кодов позволит:

- повысить достоверность контроля правильности сборки элементов конструкции;
- увеличить оперативность выявления причин поломок или аварий, произошедших с изделием;
- обеспечить автоматическое ведение баз данных о результатах сборочных работ и готовности аппарата к эксплуатации.

## Анализ эффективности применения оборудования по инженерии космических систем с точки зрения затраченного времени для практической отработки профессиональных навыков эксплуатации искусственного спутника Земли

Майгуров М.В., Лукьянов С.Д., Черданцева Елена
Научный руководитель — Шоль Д.Е.
МАИ, Москва
misha23maigurov@yandex.ru

В космической отрасли существует потребность подготовки и переподготовки специалистов в области проектирования, испытаний и эксплуатации ракетно-космических систем.

В настоящее время в России искусственные спутники Земли выполняют различные задачи. Вслед за США в России развитие космонавтики переходит в стадию роста количества частных организаций осуществляющих свою деятельность в ракетно-космической промышленности.

В сферах двух важных для государства отраслей космоса и образования существуют частные предприятия, которые производят интерактивное образовательное оборудование для студентов и специалистов.

В качестве объекта анализа были приняты:

1. Два комплекта образовательного оборудования, каждый из которых включает в себя натурный аналог-модель спутника дистанционного зондирования земли (ДЗЗ). Полезной нагрузкой спутника является камера для фотосъемки стенда-иммитатора Земли в оптическом диапазоне.
2. Натурный образец ракетно-космических систем представленный в ВУЗе.

Было произведено перекрестное практическое сравнение:

1. Двух образовательных наборов;
2. Натурных образцов ракетно-космических систем.

Для анализа были утверждены следующие критерии оценки применения в образовательном процессе ВУЗов:

1. Компактность используемого оборудования (возможность применения в малогабаритных лабораториях, не требующих больших финансовых затрат на содержание).
2. Интерактивные свойства оборудования (двухстороннее взаимодействие студента с оборудованием, участие его в процессе проектирования, создания системы управления, участия в технических испытаниях).

3. Количественное и качественное наличие учебно-методических материалов, пособий в открытом доступе.
4. Возможность использования в научных исследованиях.
5. Реализация конкурсных мероприятий для студентов и специалистов.
6. Возможность параллельной работы больших групп студентов.
7. Затраты на оборудование и сопровождение его эксплуатации.
8. Простота использования и освоения оборудования.
9. Ремонтопригодность оборудования.
10. Высокая степень подобия оборудования по отношению к реальным ракетно-космическим системам.
11. Гибкость модернизации в случае регулярного эксплуатационного сопровождения.
12. Простота и экологичность утилизации.

Результат сравнительного анализа образовательного оборудования и натурного оборудования показал, что удовлетворение критериев оценки обеспечивает необходимую и достаточную практическую наработку навыков проектирования, испытаний, эксплуатации в короткие сроки.

Образовательное оборудование, представленное частной организацией, не позволяет охватить и практически отработать все процессы, необходимые для проектирования, испытаний и эксплуатации реальной ракетно-космической системы космического аппарата.

Совместное использование двух типов оборудования (образовательного и натурного) позволит значительно сократить время, и повысить качество обучения студентов для дальнейшей работы в космической отрасли.

## Дополнение модуля LR-WPAN симулятора ns-3 для проведения имитационного моделирования беспроводных сенсорных сетей, решающих прикладные задачи в аэрокосмической области

Макашов А.А.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Терентьев М.Н.
МАИ, Москва
androwl@list.ru

Для имитационного моделирования беспроводных сенсорных сетей (БСС) используется симулятор ns-3 [1], в котором есть модуль LR-WPAN, реализующий физический и канальный уровни стека протоколов, а также механизмы взаимодействия между ними. Однако в этой модели отсутствуют сетевой и прикладной уровни. Поэтому исследователю, решившему использовать ns-3 для моделирования своей БСС, придётся создавать модель этих уровней «с нуля». Этим обосновывается актуальность задачи, решаемой в данной работе: создать универсальную модель сетевого и прикладного уровней стека протоколов поверх модуля LR-WPAN системы ns-3, которую можно использовать для моделирования различных прикладных задач.

Модель была написана на том же языке программирования, что и исходный модуль LR-WPAN – языке C++.

Модель сетевого уровня состоит из двух частей.

1. Заголовок сетевого уровня, реализованный с помощью класса NwkHeader, который содержит логические адреса узла-отправителя и узла-получателя. Класс порождён от стандартного класса заголовков ns-3, что позволяет добавлять заголовок к пакету и извлекать его одним методом, без необходимости побайтового анализа данных.
2. Основа сетевого уровня, реализованная с помощью абстрактного класса NwkLayer, который содержит методы приёма и передачи пакетов данных, методы подключения узлов к сети, методы передачи и обработки запросов на подключение к сети.

Класс наследует свойства стандартных объектов ns-3. От этого класса могут быть порождены классы сетевого уровня для различных топологий. На данный момент реализован класс StarNwkLayer для топологии «звезда».

Модель прикладного уровня взаимодействует с моделью сетевого уровня с помощью функций обратного вызова, а также с помощью вызовов открытых методов последнего.

Особенности разработанных моделей:

- все классы внедрены в систему классов ns-3, что позволяет использовать стандартные методы симулятора ns-3 для работы с создаваемыми объектами;
- передача данных на вышестоящие уровни осуществляется с помощью механизма функций обратного вызова ns-3 (при изменении значения определённой переменной вызывается указанный метод), что позволяет использовать сетевой и прикладной уровни независимо друг от друга;
- используется единый класс для узлов-координаторов и узлов-измерителей, тип узла выбирается при инициализации;
- события прикладного, сетевого и канального уровней записываются и могут быть выведены вместе или по отдельности;
- рассчитываются показатели работы БСС, такие как надёжность и скорость доставки сообщений;
- узлы могут менять своё состояние (активен/не активен), что необходимо для моделирования БСС с дискретным режимом работы.

Прикладной уровень содержит основные методы и может быть доработан для решения конкретной прикладной задачи.

В результате работы была получена модель, методы которой позволяют подключать узлы к сети топологии «звезда» и осуществлять передачу данных по этой сети, не изменяя сетевой уровень и другие нижестоящие уровни, что позволяет решать с помощью этой модели широкий круг задач и упрощает процесс моделирования беспроводных сенсорных сетей.

С помощью данной модели была решена прикладная задача, заключающаяся в исследовании показателей работы БСС, обслуживающей крупномасштабный объект [2]. Объектами являются узлы и агрегаты аэрокосмической техники, находящиеся на испытательных стендах. Сеть измеряет параметры работы этих систем во время проведения испытаний.

Направление дальнейшей работы – расширение модели для поддержки сетей других топологий и добавление новых возможностей, таких как поддержка различных способов отправки запросов на подключение к сети, реализация различных методов маршрутизации и назначения логических адресов узлам сети.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ

в рамках научного проекта № 17-08-01641а

Библиографический список

1. ns-3 [Электронный ресурс] / сайт NSNAM. — Режим доступа: http://www.nsnam.org

2. Гинзбург И.Б., Падалко С.Н., Терентьев М.Н. Система мониторинга крупномасштабных объектов на базе многошлюзовой БСС с автономными отказоустойчивыми веб-клиентами. - Электросвязь. 2017. №9. с. 60.

# Разработка распределённой системы мониторинга состояния летательного аппарата на основе беспроводных сенсорных сетей

Мельник Д.Ю.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Терентьев М.Н.
МАИ, Москва
melnikdy@ya.ru

Во время лётных испытаний современных летательных аппаратов одной из важнейших задач является мониторинг технического состояния и параметров эксплуатации. Для этого в конструкцию летательного аппарата внедряются дополнительные датчики, а также дополнительная кабельная сеть для передачи данных в бортовые средства объективного контроля.

Внедрение беспроводной сенсорной сети позволяет избежать внесения серьёзных конструктивных изменений в конструкцию летательного аппарата, сэкономить на весе кабельной сети и, как следствие, сохранить лётные характеристики. Беспроводной канал упрощает передачу показателей с подвижных элементов конструкции, в том числе с таких высоконагруженных систем как силовые установки, где в настоящее время используются сложные и менее надежные (из-за необходимости электрического соединения) датчики.

Самоорганизующаяся и самовосстанавливающаяся ячеистая топология беспроводной сенсорной сети [1, 2] обеспечивает непрерывность передачи и регистрации параметров, независимо от целостности и физического расположения групп датчиков. Благодаря применению современной микроэлектроники с низким энергопотреблением, батареи измерительных модулей обеспечат длительную работу без необходимости обслуживания или замены. В основе модулей могут лежать любые существующие датчики, не требующие высокой мощности источника: тензорезистивные датчики, акселерометры и вибродатчики, термодатчики, датчики статического и динамического воздушного давления, жидкостные датчики давления, магнитные датчики и другие.

Сетевые координаторы, обеспечивающие организацию и установку параметров сети, ретрансляцию полученных данных на запись, могут быть выполнены как отдельные блоки, тем самым обеспечивая гибкость применения данной системы. В случае более глубокой интеграции данной технологии, координаторы могут стать неотъемлемой частью испытательных средств объективного контроля.

Применимость беспроводных сенсорных сетей мониторинга параметров летательного аппарата не ограничивается стадией лётных испытаний [3]. Внедрение данной системы возможно даже на стадии эксплуатации, что позволит нарастить количество отслеживаемых параметров без серьёзных доработок, и, как следствие, оптимизировать график и снизить стоимость обслуживания, продлить срок безаварийной эксплуатации и поддерживать надлежащий уровень безопасности полётов.

Список литературы

1. Терентьев М.Н. Обзор публикаций, посвящённых самоорганизации беспроводных сенсорных сетей // Труды МАИ. 2017. №94. URL: http://mai.ru//upload/iblock/43d/terentev_rus.pdf

2. Падалко С.Н., Терентьев М.Н. Самоорганизация в древовидных персональных беспроводных сетях при наличии нескольких шлюзов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.Приборостроение. 2017. № 1. С. 75–85. DOI: 10.18698/0236-3933-2017-1-75-85.

3. Гинзбург И.Б., Падалко С.Н., Терентьев М.Н. Концепция систем дистанционного мониторинга процессов производства и испытаний аэрокосмической техники на основе многошлюзовой беспроводной сенсорной сети с автономным веб-приложением // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. № 4. С. 58-61.

# Применение технологии дополненной реальности при эксплуатации аэрокосмических комплексов и систем

Мигушин Ю.А.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Падалко С.Н.
МАИ, Москва
imigushin@gmail.com

Чтобы расширить возможности космических систем предлагается использовать технологию дополненной реальности. С ее помощью возможен быстрый обмен данными между участниками космической программы, упрощенное эксплуатации роботизированных средств, доступ к таким данным датчиков, как параметры различных систем, обзор с удаленных камер наблюдения, удаленный рабочий стол.

Во время выполнения космических программ на поверхности объектов Солнечной системы, предусматривающих выполнение задач на удалении от станции, может понадобиться обращение к ее базе данных, для чего участник космической программы, снаряженный оборудованием с технологией дополненной реальности, сможет войти в систему, используя свой нашлемный интерфейс дополненной реальности. Для этого ему будет необходимо всего лишь посмотреть на нужный элемент спроецированного изображения и действие будет выполнено. Таким образом, при занятых руках во время ремонта или других операций, участник космической программы сохраняет возможность открыть материалы, необходимые для ремонта. В случае получения травмы, связанной с потерей возможности двигаться, становится возможным вызвать помощь, открыть канал связи и сообщить о ситуации необходимую информацию, невозможную для считывания датчиками, что повышает безопасность участников космических программ. Шлем с технологией дополненной реальности позволит расширить возможности коммуникации между участниками космической программы, позволяя обмениваться и просматривать такие данные, как изображения, текстовые документы, видеотрансляции. Находясь на станции, или на удалении от станции, участник космической программы получает возможность с высокой точностью от первого лица управлять робототехническим средством, попутно имея перед собой параметры движения, параметры окружающей среды, изображения с камер видеонаблюдения, будь то камера участника космической программы, или камера на станции, или камера робототехнического средства, тем самым обеспечивая безопасное управление дронами. Благодаря проецированию карты местности на обозримую местность обеспечивается высокий уровень ориентирования на местности и следовательно безопасности при выполнения задач, в том числе во время эксплуатации робототехнических средств.

Шлем является средством ввода-вывода информации, обрабатываемой на станции вычислительным комплексом и собираемой с массива различного типа датчиков, хранилищ данных и т.д. Управление интерфейсом может быть осуществлено с помощью захвата движения глаз, а получаемое изображение может проецироваться на стекло шлема. Передача сигнала на большие расстояние возможно реализовать через находящийся на орбите малый спутник при снабжении наземного транспортного средства и станции соответствующими средствами связи.

Комплекс шлема, оборудованного технологией дополненной реальности, возможно применять при эксплуатации и различного рода производственных процессах наземных систем. В этом случае, ввиду отсутствия необходимости в защите головы шлемом становится возможным использование облегченного оборудования в качестве очков с технологией дополненной реальности. Примером являются успешно показавшие себя очки компании LLVision, обеспечивающие захват и распознавание лиц с помощью камеры на

очках, а обработку данных на мобильном устройстве, при этом весь цикл комплексом выполняется менее секунды.

Применение технологии дополненной реальности может оказать значительное положительное влияние на эффективность процессов в аэрокосмических комплексах и системах, а также безопасность участников космических программ и технических средств при их эксплуатации на поверхности объектов Солнечной системы.

Литература:

1. Яковлев Б.С., Пустов С.И. История, особенности, перспективы технологии дополненной реальности / Известия ТулГУ, 2013, вып.3 - 479-484.

2. Caudell T.P., Mizell D. Augmented reality: an application of heads-up display technology to manual manufacturing processes. In Proceedings of the Twenty-Fifth Hawaii International Conference on System Sciences, 1992. P. 659-669. 1992

3. Davies P., Sivich L. Augmented Reality and Other Visualization Technologies for Manufacturing in Boeing. SAE International Journal of Aerospace. November 2011. Vol. 4. №2. P. 1113-1139. 2011.

4. R. Azuma. A Survey of Augmented Reality. Presence: Teleoperators and Virtual Environments 6, 4 (August 1997), 355-385.

## Исследование опасных факторов при работе с высококонцентрированным пероксидом водорода: причины, последствия и способы снижения риска

Могдалев А.М.
Научный руководитель — к.т.н. Шаповалов Р.В.
МАИ, Москва
mogdalev.am@gmail.com

Вопросы безопасности обслуживающего персонала и окружающей среды в ракетно-космической технике всегда имели первостепенный характер. Обеспечение безопасности является приоритетной задачей при эксплуатации действующих и проектировании новых космических систем. Одними из основных факторов, ока-зывающих влияние на безопасную работу обслуживающего персонала на старто-вом комплексе, являются компоненты ракетного топлива. Любая топливная пара, применяемая в настоящее время, имеет как свои преимущества в вопросах обеспе-чения безопасности, так и недостатки, накладывающие определенные требования к проведению операций транспортирования, хранения, а также заправки баков ракет космического назначения. В данной работе проводится исследование опасных факторов, возникающих при работе с высококонцентрированным пероксидом водорода, изучаются их причины и последствия, а также способы снижения рисков.

Целями выполнения данной работы являются:

1. Проведение анализа нормативно-технической документации, регламентирующей производство, транспортирование и эксплуатацию высококонцентрированного пероксида водорода отечественного и зарубежного производства, применяемого в ракетах-носителях семейства «Союз», с точки зрения обеспечения безопасного обращения с высококонцентрированным пероксидом водорода;
2. Исследование правил и мер безопасности при работе с высококонцентрированным пероксидом водорода, установленных в нормативно-технических документах, а также конструкторской документации на действующие системы заправки перекисью;
3. Изучение организационно-технического обеспечения безопасности при ра-боте с пероксидом водорода на космодромах России.

На основании проделанной работы можно сказать, что:

1. Требования, предъявляемые к высококонцентрированному пероксиду водо-рода марки «Propulse» производства немецкой фирмы «Evonik», используемого в качестве

рабочего тела турбонасосного агрегата ракеты носителя «Союз-СТ-А» и ракеты-носителя «Союз-СТ-Б», значительно ниже, чем аналогичные показатели, предъявляемые к высококонцентрированному пероксиду водорода отечественного производства.

2. Требуется возрождение отечественных предприятий по производству высококонцентрированного пероксида водорода с использованием в производстве современных и технологичных методов производства продукта.

3. Несмотря на высокую стабильность, основной причиной возникновения опасных факторов при работе с высококонцентрированным пероксидом водорода является его подверженность к саморазложению в присутствии каталитически активных элементов.

4. Основными способами снижения риска работы с высококонцентрированным пероксидом водорода является безусловное соблюдение требований конструктор-ской и эксплуатационной документации, как в части применяемых материалов, так и в части технологии проведения работ, а также выполнение организационно-технических правил соблюдения безопасности при работе с высококонцентрированным пероксидом водорода.

## Оценка возможных последствий при возникновении нештатных ситуаций в ходе эксплуатации ракетно-космических комплексов

Нурмухамедова А.Д., Алексеева Н.Н.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Палешкин А.В.
МАИ, Москва
gusevevgeniy76@gmail.com

Стартовая площадка для ракеты-носителя «Союз-2» на космодроме Восточный была введена в эксплуатацию в 2016 году. Весной этого же года осуществлен первый успешный пуск РН «Союз-2.1а» с площадки 1С с разгонным блоком «Волга». Носитель вывел на орбиту спутники «Ломоносов», «Аист-2Д» и «СамСат-218». Осенью 2017 года состоялся второй запуск РН «Союз-2.1б» с разгонным блоком «Фрегат». Запуск считается неудачным, так как полезная нагрузка была потеряна. К аварийной ситуации привела нештатная работа разгонного блока после его отделения от ракеты-носителя. В планах запусков на 2018 год – восемь пусков РН «Союз» с РБ «Фрегат». Поэтому оценка возможных последствий при возникновении нештатных ситуаций в ходе наземной подготовки и эксплуатации РБ «Фрегат» и блока выведения «Волга» является актуальной.

РБ «Фрегат» и блок выведения «Волга» используют токсичные компоненты топлива такие как несимметричный диметилгидразин (НДМГ), 1750 кг – на РБ «Фрегат» и 318 кг в блоке выведения «Волга» и азотный тетраоксид (АТ), 3600 кг– на РБ «Фрегат» и 582 кг в блоке выведения «Волга». Поскольку габариты разгонного блока «Фрегат» (и соответственно масса заправки) больше габаритов блока выведения «Волга», то оценки, полученные для разгонного блока «Фрегат» можно распространить и на блок выведения «Волга». Но стоит отметить, что расчет зон возможного поражения для блока выведения «Волга» не производился.

В статье проанализированы главные этапы процесса эксплуатации, на которых возможно развитие аварийной ситуации. К ним возможно отнести:

– операции проводимые в процессе подготовки и пуска ракеты-носителя, а именно: заправка ракеты-носителя, разгонного блока, блока выведения;

– непосредственно старт и полет ракеты-носителя на активном участке траектории.

Произведен расчет последствий возможных нештатных ситуаций и аварий при подготовке блока выведения «Волга». Для анализа радиусов зон возможного поражения технического персонала необходимо учесть ряд факторов: степень вертикальной устойчивости атмосферы, скорость ветра, тип местности, время испарения, температуру воздуха, физико-химические свойства компонентов топлива и др. Расчет зон опасного

поражения технического персонала при раздельных проливах НДМГ и АТ полной массы заправки производился в соответствии с методическими рекомендациями: « РД 52.04.253 – 90». В расчетах с целью получения максимальных оценок рассматривались наиболее неблагоприятные условия состояния атмосферного воздуха – инверсия, скорость ветра 1 м/с, температура окружающей среды 200С. По результатам расчета получилось, что глубина зоны заражения для НДМГ составит 1,82 км, а для АТ – 0,6 км. Если сравнивать глубину зоны поражения РБ «Фрегат» и блока выведения «Волга», то можно сделать вывод, что по НДМГ радиус зоны поражения токсичным компонентом при аварии РБ «Фрегат» будет в пять раз больше, а по АТ радиус зоны поражения токсичным компонентом будет в шесть раз больше.

## Построение полнофакторного эксперимента с применением модели искусственной нейронной сети

Оболенцев Д.С., Панченков А.Г., Кумаров Р.А.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Крылов А.А.
ВУНЦ ВВС «ВВА», Воронеж
obolencev96@mail.ru

В основе современных методов определения тех или иных результатов эксперимента, существуют различные способы достижения поставленных целей. Одним из таких методов является постановка полного факторного эксперимента. План проведения записывается в виде матрицы планирования, в которой в определенном порядке перечисляются различные комбинации факторов на необходимых уровнях. При проведении экспериментов получают значения исследуемой величины для каждого опыта (или серии опытов). Затем переходят к построению математической модели. Обычно проводят несколько серий опытов для каждого эксперимента, с целью проверки уравнения на адекватность. В дальнейшем пользуются определенным алгоритмом для определения конечных результатов. Анализ предполагает интерпретацию полученной модели. Её необходимо записывать в кодированных переменных.

Общий алгоритм представлен в следующем виде:

* кодирование переменных;
* построение матрицы планирования в кодированных переменных с учетом парных взаимодействий и дополнение столбцом средних значений отклика;
* нахождение уравнений регрессии;
* проверка вычисленных коэффициентов на значимость, предварительно определив дисперсию воспроизводимости, и получив уравнение регрессии в кодированных переменных;
* проверка полученного уравнения на адекватность;
* проведение интерпретации полученной модели;
* выписывание уравнения регрессии в натуральных переменных.

Авторами предлагается построение полнофакторного эксперимента с применением модели искусственной нейронной сети, которая представляет собой совокупность этапов: определения структуры нейронной сети (ИНС), формирования обучающей выборки, обучение и идентификация процесса постановки полнофакторного эксперимента. Основным компонентом нейросетевой модели является ИНС, состоящая из 2 слоёв с гиперболической тангенциальной функцией активации в скрытом слое и линейной функцией активации в выходном слое, с 14 нейронами в скрытом слое, элементами запаздывания на входе модели с двумя и одним на выходе. Применение нейросетевой модели получить количественные значения уравнения регрессии в натуральных переменных в зависимости от входных параметров. К достоинствам рассматриваемого метода относится:

* минимизации общего числа опытов;

* получение математического аппарата, описывающего процесс исследования;

* выбор четкой стратегии, позволяющей принимать обоснованные решения после каждой серии эксперимента.

Таким образом, в рамках тезиса доклада была раскрыта возможность построение полнофакторного эксперимента с применением модели искусственной нейронной сети, с указанием возможных параметров ее архитектуры.

## Автоматизированная система сбора, учета и рассмотрения заявок по поддержанию в рабочем состоянии аэрокосмических систем и наземных комплексов

Островский А.Г.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Бродский А.В.
МАИ, Москва
zotovcontact@gmail.com

Целью работы является создание приложения, которое позволит быстро и своевременно реагировать на неисправности аэрокосмических систем и наземных комплексов, что позволит поддерживать их в работоспособном состоянии. Также приложение позволит повысить безопасность обслуживающего персонала, путем быстрого реагирования на возникающие проблемы.

Приложение будет реализовано с помощью функционала, который предоставляет платформа для автоматизации бизнес-процессов – Pega 7. Данная платформа хорошо подходит для автоматизации бизнес-процессов предприятий машиностроения и технического обслуживания, предоставляет единое пространство для разработки и тестирования функционала и проста при работе конечного пользователя с приложением [1].

Предлагаемая система создается для достижения следующих целей:

1. повышение безопасности эксплуатации аэрокосмических систем и наземных комплексов;
2. создание единого пространства взаимодействия наземных подразделений;
3. повышение прозрачности процессов, возможности отслеживать и контролировать исполнение бизнес-процесса, своевременно реагировать на возникающие сложности;
4. сокращение сроков обработки запросов;
5. сокращение трудозатрат структурных подразделений по соответствующим бизнес-процессам;
6. снижение рисков ошибок и потери информации, сбоев в работе по причине смены / отсутствия на рабочем месте сотрудников.

Для оценки поступающих в систему сообщений о проблемах (заявок) и для удобства работы над заявкой будут реализованы следующие части приложения:

1. входная экспертиза,
2. экспертный совет,
3. техническая экспертиза,
4. производственная экспертиза,
5. медицинская экспертиза,
6. организационная экспертиза,
7. планирование доставки,
8. создание портала пользователей,
9. отчетность.

От обслуживающего персонала аэрокосмической системы или наземного комплекса, либо непосредственно с датчиков [2, 3], поступает сообщение о какой-либо неисправности.

Сначала заявка проходит входную экспертизу, которая оценивает срочность проблемы и создает в системе соответствующею задачу. Затем экспертный совет разбирает проблему и назначает экспертизы, которые необходимо пройти задаче, в зависимости от сути проблемы. Задача проходит все назначенные экспертизы: техническую, производственную, медицинскую, организационную. Если для исправления проблемы необходима поставка груза, то проводится планирование доставки. После прохождения задачей всего цикла, она считается завершенной и по ее результатам производятся назначенные в ходе ее выполнения работы.

Данное приложение позволит значительно ускорить все этапы решения проблем возникающие при эксплуатации аэрокосмических систем и наземных комплексов. Позволит гарантировать прохождение всех необходимых экспертиз и наглядно продемонстрирует результат по каждой из них в кроссплатформенном отказоустойчивом веб-приложении [4]. Удобный пользовательский интерфейс позволит быстро овладеть приложением. А графики отчетности позволят контролировать задачу на всех ее этапах, видеть эффективность работы и результаты.

Список литературы

1. Jones T., Schulte W.R., Cantara M. Magic Quadrant for Intelligent Business Process Management Suites // Gartner. 2014. URL: https://www.gartner.com/doc/2684315/magic-quadrant-intelligent-business-process

2. Гинзбург И.Б., Падалко С.Н., Терентьев М.Н. Система мониторинга крупномасштабных объектов на базе многошлюзовой БСС с автономными отказоустойчивыми веб-клиентами // Электросвязь. 2017. № 9. С. 60-66.

3. Гинзбург И.Б., Падалко С.Н., Терентьев М.Н. Концепция систем дистанционного мониторинга процессов производства и испытаний аэрокосмической техники на основе многошлюзовой беспроводной сенсорной сети с автономным веб-приложением // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. № 4. С. 58-61.

4. Гинзбург И.Б. Концепция построения распределенных систем информационной поддержки технического обслуживания аэрокосмической техники с использованием функционально насыщенных веб-клиентов // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. № 5. С. 159-161.

## Отработка конструктивных модификаций пусковой установки ракеты космического назначения на газодинамическом стенде

Певтулиди Т.А.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Торпачев А.В.
МАИ, Москва
tanya.pevtulidi@yandex.ru

При старте любой ракеты космического назначения возникает комплекс газодинамических нагрузок, определяющий облик стартового сооружения и мероприятия по защите самой ракеты и элементов пусковой установки от действия сверхзвуковых газовых струй, в том числе включающих нагрузки знакопеременного (пульсационного) характера.

Наиболее мощным источником пульсаций давления является область натекания струй на преграды (элементы пусковой установки, лоток газоотражателя, плоскость пускового стола).

Для решения данной проблемы создана специальная модель пусковой установки в масштабе М 1:30. На данной модели будут проводиться испытания на газодинамическом стенде для измерений параметров газодинамических, акустических, эжекционных и тепловых процессов.

Объектами испытаний являются модели перспективной ракеты космического назначения (РКН) и пусковой установки (ПУ) изменённой конструкции (перекрытие

газоотводного канала, наличие эжекционных окон, увеличение глубины газохода) масштаба М 1:30 для экспериментальной отработки газодинамики стартового комплекса космического ракетного комплекса тяжелого класса.

Целью испытаний на газодинамическом стенде на моделях РКН и ПУ является отработка конструктивных модификаций ПУ (перекрытие газоотводного канала, наличие эжекционных окон, увеличение глубины газохода) и определение максимальных уровней акустических и эжекционных нагрузок при изменении конструкции ПУ (без водоподачи).

Задачами испытаний являются:

- регистрация газодинамических, акустических, эжекционных и тепловых параметров на моделях РКН и ПУ измененной конструкции масштаба М 1:30 в 20-ти испытаниях на газодинамическом стенде без работы системы водоподачи (СВП);
- измерение режимных параметров установки при проведении испытаний;
- проведение обработки и анализа результатов измерений газодинамических, акустических, эжекционных и тепловых нагрузок на моделях РКН и ПУ;
- сопоставление полученных данных с результатами ранее проведенных испыта-ний на газодинамическом стенде с моделями РКН и ПУ первоначальной конфигурации;
- определение (пересчет) газодинамических, акустических, эжекционных и тепловых нагрузок на РКН и ПУ доработанной конструкции в натурных условиях старта (без работы СВП)

Задача снижения нагрузок на ракету космического назначения и пусковую установку является актуальной, так как при меньших нагрузках увеличивается ресурс конструкций.

В дальнейшем исследовании, на основании полученных данных будут проводиться численные расчеты газодинамики с целью определения максимального эжекционного нагружения РКН.

## Доработка устройства фиксации фермы удержания ракеты на пусковом столе

Пискунов М.А.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Торпачев А.В.
МАИ, Москва
masiok.ololo@mail.ru

Усовершенствование стартового оборудования является неотъемлемой частью в развитии космической отрасли, так как это влияет на качество пусков ракет.

С этой целью была проведена доработка устройства фиксации фермы удержания.

Эта необходимость появилась из-за того, что в существующем устройстве основным недостатком является трудность точного совмещения осей двух частей устройства фиксации, расположенных на двух стрелах фермы удержания, так как совмещение осуществляется на расстоянии 15 метров от оси вращения каждой стрелы, при этом, расстояние между осями вращения стрел 23,5 метров. Причиной этого недостатка является несовершенная конструкция устройства фиксации, а именно ширина зева.

Доработка устройства фиксации осуществлялась при помощи имитационной модели и путем прорисовки нескольких вариантов ширины зева с учетом отклонений, вызываемых различными факторами, которые приводят к отклонению осей относительно оптимального положения.

Работа с имитационной моделью позволила создать несколько вариантов доработки устройства фиксации. Помимо конструкционных изменений, каждый из вариантов прорабатывался с учетом отклонений стрел на 1º, 15´ и 10´, так как расхождения при таких углах составляет соответственно 332мм, 82мм и 54мм.

Такие проработки позволили выбрать оптимальный вариант устройства фиксации, с последующей его доработкой. Это помогло избежать нестыковку двух частей устройства при схождении двух стрел фермы удержания.

Доработанная модель устройства фиксации позволяет осуществить более точное соединение оси ригеля с зевом замкового устройства, с учетом всех основных факторов, влияющих на отклонение точки пересечения траекторий перемещения стрел фермы удержания.

## 3D-визуализация информации в SCADA-системе HMI диспетчера

Полищук С.Д.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Бродский А.В.
МАИ, Москва
polischouckserg@yandex.ru

SCADA (от англ. Supervisory Control And Data Acquisition) – программное обеспечение для сбора данных об объекте мониторинга и предоставление операторского контроля за технологическими процессами (ТП) в реальном времени.

HMI (от англ. Human-Machine Interface) это процесс взаимодействия человека с интерактивными компьютерными системами. Изучение этого процесса ведется с целью анализа и улучшения качества интерфейсов взаимодействия человека и компьютера, в том числе, для повышения показателей эффективности эксплуатации и безопасности SCADA-систем.

HMI присутствуют на любом предприятии, производящем аэрокосмические системы и комплексы. Кроме функциональных требований к HMI для SCADA, не последнее место занимает визуализация и представление данных реального времени об объекте мониторинга. На сегодняшний день, большинство технологических процессов представлены как плоские изображения со значениями измеряемых переменных, что представляет собой большой поток информации.

Новый подход к визуализации заключается в трехмерном представлении каждого объекта ТП. 3D модели объектов дополняются анимациями, демонстрирующими физический процесс, с возможностью наглядно показывать состояние реального объекта, то есть его «цифровой двойник». В таком случае диспетчер видит максимально приближенную к действительности картину ТП, снижается когнитивная нагрузка, повышается возможность принятия верных решений. Использование 3D-визуализации повысит эффективность процесса обучения новых диспетчеров. Несомненным плюсом такого подхода является то, что визуализация может происходить не на основе реальных данных с сенсоров, а с помощью данных, рассчитанных в математической модели, что позволяет наблюдать весь ТП до создание реального производства. Примером может послужить визуализация ТП изготовления авиационного двигателя и его узлов, тогда данные для визуализации будут браться от сенсоров на станках и конвейерах.

Решение поставленной задачи предлагается следующим путем – создание программного модуля для получение данных по сети от источника данных (модель или сенсоры), затем анализ данных на предмет соответствия значений допустимы диапазонам (для анимации критический состояний), осуществление рендеринга и интерактивного взаимодействия с пользователем, выбор объекта, разреза и угла обзора.

# Рентгеноскопический контроль элементов конструкции самолета с сотовым заполнителем

Поспелов А.А., Шахлай Д.В.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Крылов А.А.
ВУНЦ ВВС «ВВА», Воронеж
pospelov97@mail.ru

Одним из важных мероприятий инженерно - авиационно службы по поддержанию заданной исправности воздушных судов (ВС) военного назначения является своевременное обнаружение дефектов за счет использования методов неразрушающего контроля.

На сегодняшний день в ВКС используется множество различных методов неразрушающего контроля к основным, из которых можно отнести:

− вихретоковый метод;

− ультразвуковой метод;

− оптиковизуальный метод;

− акустический импедансный метод;

− тепловой метод;

− радиационный метод, который в свою очередь делятся на рентгенографический и рентгеноскопический методы. В рамках проведенных исследований для контроля элементов конструкции с сотовым заполнителем использовалась рентгеноскопическая установка «Норка». Контроль проводится по следующей методике:

1 Формирование исходных данных:

− параметры характеризующие установку «Норка»;

− параметры характеризующие особенности конструкции воздушного судна;

− ограничения согласно цели исследований;

2 Методика рентгеноскопического контроля сотовых конструкций ВС:

2.1 Подготовка и настройка параметров установки «Норка»:

− подготовка проверяемого объекта и установки к контролю;

− выбор схемы просвечивания;

− определение параметров анодного тока и напряжения;

− определение фокусного расстояния от излучателя до объекта контроля;

− определение влияния угла отклонения излучателя относительно объекта контроля на качество снимка.

2.2 Модель оценки качества снимка:

− формирование базы снимков, которая учитывает параметры анодного тока, фокусного расстояния от излучателя до объекта контроля;

− экспертная оценка базы снимков и дисперсионный анализ экспериментальных данных;

− рекомендации по настройке параметров установки;

2.3 Выполнение дефектации объекта контроля:

− корректировка параметров установки «Норка» согласно модели оценки качества снимков;

− дефектация объекта контроля согласно схеме просвечивания;

− расшифровка снимком, анализ результатов;

3 Формирование рекомендаций по выполнению неразрушающего (рентгеноскопического) контроля деталей с сотовым заполнителем ВС.

Таким образом контроль элементов конструкции ВС с сотовым заполнителем с использованием рентгеноскопической установки «Норка» позволили качественно проводить дефектацию с меньшим количеством снимков за счет настройки анодного тока на излучателе. Полученные рекомендации реализованы в авиационной части и в учебном процессе ВУНЦ ВВС «ВВА» на кафедре восстановления авиационной техники.

## Имитаторы на основе сетчатых излучателей

Пронина П.Ф., Кыласов М.Я., Ершова А.О.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Колесников А.В.
МАИ, Москва
pronina-p19.94@yandex.ru

Излучатели имитаторов выполняются в виде токопроводящих сеток, устанавливаемых в непосредственной близости от тех участков поверхности испытываемого объекта, на которые эти излучатели должны воспроизводить расчетные внешние тепловые нагрузки. Сетки представляют собой совокупность параллельно расположенных и последовательно записываемых проводов из нихрома. Провода натягиваются на рамки, выполненные из неэлектропроводного материала, например текстолита. При этом диаметр проводов по крайней мере в десять раз меньше расстояния между соседними проводами.

Достоинством данного способа моделирования внешнего теплового воздействия является то, что такие излучатели не изменяет теплофизические и радиационные свойства облучаемой поверхности и в незначительной степени экранирует эту поверхность. Но данному способу присущи такие очевидные недостатки, которые сужают область его применения до выполнения всего лишь вспомогательных функций при наличии какого-то другого основного способа моделирования внешнего теплообмена КА. Достаточно отметить хотя бы два из этих недостатков. 1) Если поверхность испытываемого объекта имеет непростую конфигурацию, то весьма сложно, а может и невозможно будет разместить в непосредственной близости от его поверхности совокупность плоских сетчатых электронагревателей, каждый из которых оказывал лучистое тепловое воздействие лишь на определенную ограниченную часть поверхности объекта и не влиял заметным образом на соседние участки поверхности. 2) При близком расположении сетчатого нагревателя от облучаемой поверхности испытываемого объекта шаг между излучающими нитями часто бывает соизмерим с расстоянием до облучаемого объекта, что может привести к появлению недопустимой неоднородности в плотности падающего излучения.

## Место и роль неразрушающего контроля при технической эксплуатации авиационной техники

Сайганов Д.А., Сороколетов В.А., Ефремов В.А.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Крылов А.А.
ВУНЦ ВВС «ВВА», Воронеж
d.saiganov2302@mail.ru

На современном этапе развития воздушно-космических сил возрастает роль дефектоскопического контроля деталей авиационной техники, по следующим основным причинам:

− значительное усложнение авиационной техники;

− увеличение её стоимости;

− развитие тенденции эксплуатации воздушных судов (ВС) в зависимости от их технического состояния.

Неразрушающий контроль введен в технологию обслуживания авиационной техники как средство предотвращения аварий и катастроф воздушного судна (ВС) по причине разрушения высоконагруженных деталей и узлов из-за развития в них усталостных трещин, коррозионных повреждений и других дефектов сплошности материала. С этой целью в условиях аэродромов применяют комплекс методов неразрушающего контроля (НК) в который входят:

− магнитопорошковый;

− ультразвуковой;
− акустический импедансный;
− вихретоковый;
− капиллярный;
− оптико-визуальный;
− радиационный (рентгенографический и рентгеноскопический).

Задачей применения методов НК является обнаружение дефектов на ранней стадии их развития с тем, чтобы до очередного контроля проверенные детали работали безотказно. Объем профилактического НК на современных ВС сравнительно невелик. Но, как показывает практика, НК в эксплуатации главную и самую объемную задачу решает не на этапе выполнения регламентных работ, а при проведении целевых (разовых или периодических) осмотров парка ВС после проявления нового дефекта, для снятия запретов на полеты и предотвращения повторных разрушений аналогичных деталей (узлов). Кроме того, большой объем НК выполняется при углубленном исследовании технического состояния ВС для продления ресурсов и сроков эксплуатации.

Применением методов НК в разное время в авиации военного назначения были решены крупные задачи, обеспечившие возможность продолжения безаварийной эксплуатации самолетов разных типов. Например, ультразвуковой и магнитопорошковый контроль цельносварных самолетов, позволил обнаружить и заварить трещины в массивных сварных швах бака-кессона. Это дало возможность парку самолетов выработать установленный ресурс. В качестве других примеров, подтверждающих необходимость проведения внепланового срочного НК в авиационных частях за последний период (2007 – 2012 гг.), могут служить случаи разрушения балки главной ноги шасси и карданного вала системы управления изменением стреловидности крыла, полуоси стабилизатора, накладок крепления киля к подкилевой надстройке.

Таким образом, неожиданное проявление нового дефекта в виде разрушения ответственной детали, имеющее катастрофические последствия, всегда требует организации массового контроля соответствующей авиационной техники. Решать эту задачу приходится в экстренном порядке. Такой контроль получается эффективным только в том случае, если к нему все готово: имеются обученные специалисты, исправная современная аппаратура и соответствующая система управления организацией НК.

## Безопасность обслуживающего персонала на космодроме «Восточный»

Сельцова С.А.
Научный руководитель — Гусев Е.В.
МАИ, Москва
www.Golubyanka@yandex.ru

В современном мире технологии имеют очень большую роль в развитии человечества. В особенности, важное значение имеет ракетно-космическая промышленность.

В 2016 году открылся первый российский гражданский космодром «Восточный», расположенный на Дальнем востоке в Амурской области. При строительстве и выборе места учитывались многие территориальные факторы: удаление от жилых районов (населенных пунктов), доступ к транспортным перевозкам, климат, географические особенности местности и т.д. Одним из важнейших факторов является обеспечение безопасности населения, проживающего вблизи космодрома и, в частности, обслуживающего персонала.

В своей работе я расскажу о существующих угрозах для жизни людей вблизи космодрома и методы их устранения.

Для обеспечения безопасности обслуживающего персонала на космодроме существует ряд критериев, которые можно разделить на 4 группы:

1. Проектные решения при создании космодрома и его комплексов.
2. Конструкция технологических систем и агрегатов.
3. Создание и использование средств индивидуальной защиты.
4. Организационные аспекты.

Несмотря на вышеперечисленные критерии, при проведении испытательных и эксплуатационных работ на космодроме вводятся зоны безопасности. Данные зоны распределяются в зависимости от степени наибольшей опасности для жизни человека. А именно, вводится максимально допустимая дистанция до пускового устройства, непосредственно при запуске ракеты. А также уровень шума, который не должен превышать 135 дБ.

Развитие науки не стоит на месте. И чем больше развиваются технологии, тем больше возникает проблем, связанных с эксплуатацией нового оборудования. Инновации - это не только новые возможности, но и новый риск для человека.

Именно поэтому, при работе на космодроме и близлежащих территориях необходимо не только соблюдать технику безопасности, но также вовремя проводить техническое обслуживание всех систем космодрома и его комплексов.

## Система автоматизированного тестирования интерфейсов приложений для управления полетами космических аппаратов и эксплуатации аэрокосмической инфраструктуры

Соломонова М.К.
Научный руководитель — к.т.н. Гинзбург И.Б.
МАИ, Москва
ritasolomonova@gmail.com

Для управления полетами и наземной инфраструктурой используются различные приложения для стационарных и мобильных устройств, все чаще веб-приложения [1, 2]. Данные приложения обеспечивают отображение данных, полученных с действующих космических аппаратов и спутников, сведений о состоянии наземных устройств и отправки управляющих команд. Использование данных приложений позволяет в режиме реального времени осуществлять управление полетами и наземными устройствами.

Интерфейс используемых приложений выполняет функции отображения информации (телеметрия, состояние устройств и датчиков, справочная информация) и обеспечения ввода данных пользователем (различные формы, базы данных, автоматизированные рабочие места операторов и пульты управления).

Продуманный работающий без ошибок интерфейс является важным фактором обеспечения безопасности работы таких систем, так как этот интерфейс используется для принятий ответственных решений. Необходимо проводить тщательное тестирование работы интерфейсов с целью проверки реализуемости функциональных требований, то есть способности системы в процессе эксплуатации безошибочно решать нужные пользователям задачи.

Предлагается автоматизированная система, которая будет проводить тестирование интерфейсов (на примере онлайн-табло телеметрии [3, 4, 5]) и фиксировать дефекты в работе программы, если таковые будут обнаружены. В данной работе тестируемая система рассмотрена как веб-приложение. Для того, чтобы реализовать автоматизированную систему тестирования веб-приложения был выбран инструмент для автоматизации процесса, а именно комплекс инструментов для управления браузером – Selenium.

Selenium – это комплекс из нескольких инструментов, каждый из которых предлагает свой собственный подход к автоматизации тестирования [6]. В совокупности набор

инструментов Selenium предоставляет богатые возможности для тестирования всех типов веб-приложений.

Для того, чтобы система для управления полетами и контроля состояния космических аппаратов работала надежно и отображала корректные данные о полетах, реализованы тестовые сценарии и описаны алгоритмы, с помощью которых система тестирования будет принимать решения о запуске различных проверок работы тестируемой системы.

Рассмотренная в докладе система тестирования применима для тестирования любых веб-приложений, к которым предъявляются повышенные требования по стабильности и безопасности. Например, для тестирования авиационных систем, которые предоставляют доступ к местоположению самолетов и их показателям в режиме реального времени, а также для тестирования других транспортных систем.

Использованные источники

1. Гинзбург И.Б., Падалко С.Н. Автономные веб-приложения для систем обработки космической информации // Труды МАИ. 2015. № 82. С. 38.

2. Гинзбург И.Б. Состав и архитектура взаимодействия модулей функционально насыщенного автономного веб-приложения для распределенных систем информационной поддержки различных этапов жизненного цикла аэрокосмической техники // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. № 6. С. 130-133.

3. Live real time satellite tracking and predictions // URL: http://www.n2yo.com/

4. World Map of Live Satellite Positions – In-The-Sky.org // URL: https://in-the-sky.org/satmap_worldmap.php

5. SATVIEW - The most complete list of satellites in the sky // URL: http://www.satview.org/

6. Selenium – Web Browser Automation // URL: http://www.seleniumhq.org/

## Использование термоэкранов и галогенных ламп для моделирования тепловых нагрузок на поверхность космического аппарата

Сыздыков Ш.О., Палешкин А.В.
МАИ, Москва
legalize1991@mail.ru

При подготовке и проведении тепловакуумных, вакуумно-температурных, и комплексных электрических испытаний космических аппаратов (КА) или их отдельных фрагментов проявляется все больший интерес к упрощенным средствам экспериментального моделирования внешних тепловых нагрузок на поверхности испытуемых объектов. Это связано в основном со следующими обстоятельствами. Во-первых, использование имеющихся тепловакуумных установок, оснащенных имитаторами солнечного излучения, во многих случаях является нецелесообразным по экономическим и организационным соображениям. Во-вторых, при испытаниях аппаратов, изменяющих в условиях штатной эксплуатации свою ориентацию относительно источников внешних тепловых потоков, из-за невозможности (по техническим причинам) вращать испытуемый объект относительно двух и, тем более, трех осей возникает необходимость в использовании упрощенных средств имитации внешних тепловых потоков даже при наличии в составе установки имитатора солнечного излучения. Кроме того следует отметить то, что при использовании имеющихся имитаторов солнечного излучения часто возникают проблемы, обусловленные различным поведением радиационнно- оптических покрытий поверхности КА по отношению к излучению Солнца и излучению солнечного имитатора. Это объясняется, в первую очередь, отсутствием в спектре имитатора той части жесткого электромагнитного излучения (ультрафиолетового, рентгеновского и т.д.) которая вызывает деградацию наружных покрытий при штатных условиях эксплуатации.

Наблюдается все возрастающий интерес к термобарокамерам, оснащенным специальными термоэкранами (термочехлами) и системами галогенных ламп накаливания. В таких термобарокамерах на поверхности термоэкранов с помощью холодного газообразного азота и секций электронагревателей могут устанавливаться температуры в диапазоне от - - () до + - (). Не выполняя в вакуумной камере функции насосов основной откачки (насосов криоконденсационного типа), эти экраны предназначены в основном либо для термостатирования испытываемого объекта при определенном уровне температур, либо для приближенного моделирования тепловых нагрузок на поверхность испытываемого объекта. Галогенные лампы накаливания, устанавливаемые в термобарокамере на каком-либо каркасе между испытуемым объектом и термоэкранами призваны воспроизводить в совокупности с этими экранами расчетные внешние тепловые потоки, поглощаемые элементами наружной поверхности испытуемого объекта. Но при этом всегда возникает задача формирования таких управляющих воздействий на энергетические характеристики источников лучистых потоков - термоэкранов и ламп накаливания, при реализации которых обеспечивается максимально возможная точность моделирования расчетных внешних тепловых нагрузок на поверхность испытуемого объекта.

## Разработка схемы обдува замка устройства удержания ракеты космического назначения, применяемого на перспективном стартовом комплексе

Сысуев Д.И.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Блатиков Г.А.
МАИ, Москва
Dan-sysuev@yandex.ru

Тема данной научно-исследовательской работе посвящена случившемуся на испытаниях УСК «Ангара» отказу устройства фиксации ферм удержания РКН и разработке мер по его устранению.

В работе была поставлена цель создания схемы обдува замка фермы удержания РКН, применяемого на перспективном стартовом комплексе. Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Изучить замечания, описывающие произошедшее и причины отказа.
2. Провести анализ решения по введению схемы обдува, созданной для обеспечения завершения испытаний.
3. Провести анализ технической документации, а именно технических описаний и чертежей систем, задействованных в создании применённой схемы обдува.
4. Подобрать вариант для новой схемы обдува, отбрасывающий недостатки предыдущей схемы, изучить техническую сторону вопроса.
5. Провести расчёт трубопровода для схемы обдува, теоретически обосновать её работоспособность.
6. Начертить необходимые эскизы внешнего облика схемы обдува.Для многих систем безотказность, ремонтопригодность и готовность являются важнейшими характеристиками.

При проведении второго этапа комплексных испытаний УСК «Ангара» была выявлена недопустимая задержка открытия замка фермы удержания КЗБ из-за чрезмерного охлаждения гидропривода замка, вызванного воздействием паров жидкого кислорода, дренируемого из 2-й ступени РКН (замечание №9).

Была создана система обдува, которая предполагала доработку, так как имела существенный недостаток – её работа могла вызвать недопустимое падение давления в пневмоцилиндрах системы отвода ферм удержания.

По вышеуказанной причине необходимым стало создание схемы обдува, лишённой данного недостатка и не подвергающей опасности появления отказа какой-либо из систем, в связи с чем выбрана тема для написания данной научно-исследовательской работы.

## Интеллектуальная система для обеспечения эффективного технического обслуживания и ремонта аэрокосмических систем и наземных комплексов

Терехов А.С.
Научный руководитель — к.т.н. Гинзбург И.Б.
МАИ, Москва
alexander.terekh@gmail.com

Эксплуатация аэрокосмических систем и наземных комплексов с обеспечением необходимого уровня экономичности и надежности – не менее масштабная задача, чем их проектирование и производство. Чтобы гарантировать работоспособность, необходимо удовлетворять высокие требования по надежности не только отдельных узлов, модулей и агрегатов, но изделия в целом. Задача проведения своевременного технического обслуживания и ремонта (ТОиР) является одной из самых приоритетных. Решение данной задачи могла бы обеспечить интеллектуальная система поддержки процессов ТОиР, которая будет автоматически выбирать виды и состав регламентных работ на основе правил и прогнозирования по заложенным в нее данным об объектах обслуживания [2, 3].

Прогнозирование отказов блоков и узлов летательных аппаратов и наземных комплексов является непростой задачей поскольку:

– каждая система обладает собственной динамикой отказов в зависимости от условий эксплуатации, особенностей сборки, комплектующих и качества проведения предшествующих работ ТОиР;

– отказы взаимосвязаны, то есть выявленный и устраненный отказ одного компонента может повлечь дальнейшее развитие отказов в других узлах, связанных непосредственно или функционально;

– динамика отказов не случайна и может быть выявлена при анализе статистики по наработке большого парка аппаратов. Однако, выявленная однажды динамика непостоянна и может изменится с течением времени вместе с изменяющимися условиями эксплуатации.

Решение поставленной задачи предлагается осуществить следующим путем – каждой подсистеме либо узлу объекта эксплуатации ставится в соответствие программный модуль. Этот модуль представляет собой автономную программу, которая может реагировать на события, принимать решения и взаимодействовать с другими модулями. Программный модуль не требует внешних инструкций, так как реализует внутренний цикл управления. Задачей этого модуля является определение фактического либо возможного отказа системы, узлов или агрегатов на основе полученных данных: показаний датчиков [4], условий эксплуатации, статистики предыдущих отказов, показателей надежности аналогичных изделий.

Программный модуль интеллектуальной системы основан на концептуальной модели аппарата, которая представляет собой совокупность элементов, организованных в системы. Выход одного элемента (системы) является входом другого. Таким образом выстраиваются функциональные связи.

Все элементы и системы связаны пространственными отношениями. Используя эти отношения можно построить взаимосвязи отказов и их проявлений, а также прогнозировать влияние различных событий на на изменение динамики отказов:

– изменение условий эксплуатации;

– замены отказавшего блока неидентичным аналогом;

– отказов смежных или иначе связанных узлов и агрегатов.

Вероятность возникновения отказов в эксплуатируемых аппаратах и комплексах определяется данными об отказах составляющих компонентов, а так же информацией об отказах аппарата в целом. Информация о возможных проблемах сразу отображается в терминальных устройствах обслуживающего персонала посредством веб-клиентов [4], что позволяет исполнителям начать конкретные действия направленные на устранение неисправности.

Использование возможностей предлагаемой интеллектуальной системы для обеспечения эффективного ТОиР аэрокосмических систем и наземных комплексов принесет следующие результаты:

– более точное прогнозирование и предупреждение отказов на ранних стадиях;

– возможность прогнозирования вероятностей вариантов возникновения отказов;

– обеспечение оперативной и гибкой реакции на непредвиденные события;

– снижение сложности и трудоемкости работы обслуживающего персонала;

– получение экономического эффекта за счет оптимизации стратегии ТОиР для каждого эксплуатируемого изделия.

Список источников

1. Лахин О.И., Скобелев П.О., Симонова Е.В. Подход к разработке прототипа интеллектуальной системы поддержки принятия согласованных решений при проектировании малоразмерных космических аппаратов на основе мультиагентных технологий // Информационно-управляющие системы. 2015. №№2(75). С. 43-48

2. Кизим А.В. Обоснование необходимости автоматизации работ по ремонту и техническому обслуживанию оборудования // Известия ВолгГТУ. Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в техн. Системах». Волгоград, 2009. No 6. С. 118-121.

3. Кандырин Ю.В. Методы и модели многокритериального выбора вариантов в САПР. Учебное пособие для Вузов // М.: Издательство МЭИ, 2004. 172 с.

4. Гинзбург И.Б., Падалко С.Н., Терентьев М.Н. Система мониторинга крупномасштабных объектов на базе многошлюзовой БСС с автономными отказоустойчивыми веб-клиентами // Электросвязь. 2017. № 9. С. 60-66.

5. Гинзбург И.Б. Концепция построения распределенных систем информационной поддержки технического обслуживания аэрокосмической техники с использованием функционально насыщенных веб-клиентов // научно-технический вестник Поволжья. 2014. № 5. С. 159-161.

## Учет циркуляционных особенностей атмосферы при эксплуатации аэрокосмических систем

Фадеев М.А., Сыромятников С.А.
Научный руководитель — доцент, к.г.н Закусилов В.П.
ВУНЦ ВВС «ВВА», Воронеж
zakusilov04@yandex.ru

Воздушная оболочка Земли (атмосфера) существенно воздействует на движение летательных аппаратов. Для оценки влияния параметров атмосферы, при решении задач подготовки данных на пуски и оценки основных летно-технических характеристик ракетных комплексов (баллистического обеспечения ракетно-космической практики) существует глобальная справочная модель атмосферы. Она включает в себя расчетные средние месячные значения параметров атмосферы: относительного давления, относительной плотности, температуры, зональной и меридиональной составляющих скорости ветра и их вариации относительно средних значений в зависимости от географических условий,

времени года, высоты точки в диапазоне от 0 до 100 км (с детализацией: модель 0-100 км, модель 0-30 км, приземная модель).

Подбор исходных данных при построении и уточнении представленных моделей осуществляется традиционным образом: используются глобальные многолетние результа-ты аэрологических, ракетных и спутниковых измерений.

Оценки разработанных моделей в реальной ситуации достаточно различаются, но, видимо, имеют удовлетворительные для потребителя значения. Однако, на наш взгляд, при наличии достаточного объема архивных данных, есть пути их некоторого уточнения. Это связано с первичной обработкой исходных данных: их сортировкой, типизацией, а затем разработкой аналогичных уточняющих моделей.

В частности имеется возможность уточнения параметров модели для нижнего слоя атмосферы - тропосферы (примерно 0-10 км) с учетом типов (форм) атмосферной циркуляции, определяющих определенный макросиноптический процесс в атмосфере. Длительность существования при этом типа (формы) атмосферной циркуляции составляет в среднем 5-7 дней.

Тип макросиноптического процесса - это некоторая модель, в которой отражены общие основные черты определенной совокупности реально существующих макросиноптических ситуаций. Все синоптические процессы, относящиеся к одному типу, обладают общностью каких-либо основных параметров (в том числе и входящих в Глобальную модель), которые в данном случае либо остаются неизменными, либо меняются во времени однообразно.

В работе проведена типизация атмосферных процессов по методике, предложен-ной А.Л. Кацем [1] в широтной зоне 30-700 с.ш., для первого естественного синоптического района (500 з.д.-800 в.д.), для холодного периода года. В результате проведенных исследований выявлено, что в атмосфере над исследуемой территорией в рассматриваемый период преобладают процессы меридионального типа циркуляции. Они составляют 53,5%, на процессы зонального типа приходится 46,5%. Аналогичная ситуация наблюдается и по отдельным месяцам. Анализ распределения форм меридионального типа циркуляции по месяцам холодного периода показал, что несколько большую повторяемость имеет центральная форма циркуляции (16,8%), на остальные формы приходится примерно одинаковая повторяемость: восточная форма – 11,6%, западная – 12,1%, смешанная – 13,3%.

Дальнейший анализ выявил особенности в распределении средних значений метеорологических величин на различных уровнях тропосферы, при зональном типе и формах меридионального типа циркуляции. Это позволяет сделать вывод о возможности учета циркуляционных особенностей в тропосфере с целью уточнения Глобальной справочной модели.

Литература

1. Кац А.Л. Оценка возмущенности планетарной высотной фронтальной зоны умеренных широт над Северной Атлантикой.– Труды ВНИИГМИ–МЦД, 1977. – Вып. 39.

## Имитаторы тепловых нагрузок с диффузно излучающими в строго ограниченном телесном угле модулями

Шеметова Е.В.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Колесников А.В.
МАИ, Москва
elena_shemetova08@mail.ru

При тепловой отработке космических аппаратов (КА) суммарные внешние тепловые нагрузки или их отдельные компоненты часто воспроизводятся с помощью совокупности каких-либо источников излучения, размещаемых вокруг испытываемого объекта на некотором удалении от его поверхности. В качестве источников излучения могут

применяться токопроводящие и нагреваемые электрическим током ленты, полые керамические стержни с вмонтированными в них электронагревателями, сетчатые нагреватели, галогенные кварцевые лампы накаливания, и т.п. Источники излучения чаще всего применяют в совокупности с отражателями, которые позволяют повысить долю энергии излучения, направляемого в сторону испытываемого объекта. Но известные источники излучения с отражателями не позволяют формировать строго диффузный лучистый поток в ограниченном телесном угле, в котором заключен испытуемый объект, что порождает большие трудности при выборе режима работы имитатора.

В данной работе излагаются, разработанные с участием автора доклада радиационно-оптические схемы модулей имитатора, которые в направлении испытуемого объекта испускают излучение с направленной силой, характеризуемой ограниченными в той или иной степени ламбертовскими индикатрисами. В состав модулей входят диффузно излучающие в полусферическом телесном угле диски или ленты и зеркальные отражатели, поверхностью которых являются в одних случаях поверхность параболоида вращения, в других – поверхность параболического цилиндра с определенными геометрическими характеристиками направляющих линий. Реализация этих радиационно-оптических схем модулей в конструкции имитатора позволит повысить точность моделирования внешнего теплообмена КА и повысить коэффициент полезного использования подводимой к имитатору энергии.

## Обеспечение радиационной стойкости изделий электронной техники

Ярилов П.А.
Научный руководитель — Гусев Е.В.
МАИ, Москва
pavelyarilov@icloud.com

Почти каждая сфера деятельности человека сопряжена с использованием радиоэлектронной техники: и в научных исследованиях, и в повседневной работе, и при защите рубежей нашей Родины.

Условия применения электронной техники крайне разнообразны - от полюса холода до пропитанных зноем пустынь, от влажных тропиков и морского тумана до засушливых степей. В связи с этим возрастают требования к надежному функционированию электронных систем, поскольку цена потенциальной ошибки в работе электроники несоизмеримо высока. Особенно высоки требования к надежному функционированию электронных систем в объектах вооружения и военной техники, ядерной энергетике, авиационно-космической технике.

Изобретение ядерного оружия, создание ракетно-космических систем с длительным сроком активного существования и продления назначенных сроков службы, а также появление стационарных и бортовых ядерных энергетических установок заставило выделить радиационную стойкость в особую категорию требований и создать теоретическую и экспериментальную базу для разработки радиационно-стойкой радиоэлектронной аппаратуры (РЭА).

Обеспечение необходимых уровней стойкости и надежности РЭА требует применения специальных схематехнических, технологических и конструктивных решений на всех этапах ее проектирования и изготовления. В том случае, если различного рода технические устройства и объекты предназначены для работы в условиях воздействия ионизирующих излучений, сложность задач, стоящих перед разработчиком, значительно возрастает. При этом возрастают требования к достоверности оценки показателей радиационной стойкости как самой РЭА, так и ее составных частей. Завышенная оценка стойкости ИЭТ может явиться причиной незапланированного выхода техники из строя. С другой стороны,

занижение действительной стойкости приводит к необходимости доработки РЭА или к ограничению условий применения, что равносильно существенному удорожанию РЭА. Поэтому насущной проблемой радиационных испытаний является повышение степени достоверности оценки радиационной стойкости.

В статье проанализированы основные этапы обеспечения радиационной стойкости изделий электронной техники (ИЭТ):

1. Методология комплексных исследований и радиационных испытаний;
2. Анализ данных о механизме воздействия радиационных факторов на свойства ИЭТ (системный подход к проведению анализа, состав и особенности ионизирующие излучения (ИИ), воздействующих на ИЭТ, характер отказов и процессов изменения свойств ИЭТ при воздействии ИИ, обобщенная модель воздействия ИИ на параметры и свойства ИЭТ);
3. Организация и проведение радиационных испытаний;
4. Анализ экспериментальных результатов;
5. Разработка программного комплекса для хранения и первичной обработки результатов экспериментов.

# Направление №8 Новые материалы и производственные технологии в области авиационной и ракетно-космической техники

## Секция №8.1 Перспективные производственные технологии и аддитивные технологии

**Моделирование деформаций лопатки компрессора при высокоскоростном фрезеровании**

Son JIN
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Бойцов А.Г.
МАИ, Москва
entropy.jin@gmail.com

Механическая обработка тонкостенных маложестких деталей, направленная на обеспечение требуемой производительности, точности и шероховатости поверхностей, сопряжена с определенными трудностями связанными с их деформацией под действием сил резания и склонностью к возникновению вибраций. В особой мере это относится к тонкостенным деталям с переменным сечением, в частности лопаткам компрессоров авиационных двигателей и энергетических установок. В настоящее время для формообразования пера лопаток начинают широко применять технологии высокоскоростного фрезерования. Поскольку жесткость лопатки переменна как по ее длине так и в сечениях (спинка, корыто, входная и выходная кромки), для обеспечения точности необходимо программное изменение режимов обработки.

Целью настоящей работы является разработка методики численного моделирование жесткости лопатки компрессора с определением ее полей жесткости с дальнейшим переходом к решению задач оптимизации технологических режимов и их программного регулирования. Следует отметить, что экспериментальная отработка режимов резания является затратным мероприятием. В этом плане, аналитические расчёты и численное моделирование, при их должном соответствии экспериментальным результатам, позволяют сократить размеры материальных вложений.

Расчёт деформаций лопатки компрессора от воздействующих нагрузок производился численно методом конечных элементов в упругой постановке задачи. При моделировании построение геометрии лопатки компрессора велось с учётом минимальных размеров детали.

В расчёте использовалась модель упругого материала с модулем упругости и коэффициентом Пуассона, соответствующим материалу детали.

Для оценки соответствия результатов расчетов экспериментальным данным были выполнены измерения жесткости лопатки в нескольких сечениях. При этом базирование и закрепление лопатки соответствовало схеме используемой при реальной обработке (базирование по хвостовику и центровочному отверстию в технологической бобышке). В выбранных точках динамометром создавалась постоянная нормальная к поверхности сила, а измерительной системой осуществлялось измерение деформации в данной точке.

В работе рассмотрен опыт применения технологий высокоскоростного фрезерования лопаток компрессора, базовые схемы обработки, особенности обработки бандажных полок, входных и выходных кромок. Проанализировано инструментальное обеспечение обработки, конструктивные особенности инструмента применяемого для высокоскоростного фрезерования, ключевые проблемы связанные с выбором схем обработки и назначением

технологических режимов. Рассматриваются вопросы оптимизации технологических режимов высокоскоростного фрезерования на основе расчета жесткости конструкции лопатки на различных этапах ее обработки. Для определения закономерностей изменения параметром режима резания предложен расчет допустимой силы резания не вызывающей выход размера за установленные пределы, которая является функцией жесткости в месте воздействия инструмента.

Показано, что для решения существующих проблем необходим комплексный подход к разработке операций и технической подготовки производства.

## Предварительный выбор проходов при прокатке листового материала на примере систем Al-Mg-Li по данным регистрации тепловых эффектов

Агафонова Д.В.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Михеев В.А.
СНИУ им. С.П. Королёва, Самара
Dafna_Agafonova@mail.ru

Создание авиационной техники с меньшей массой является одной из приоритетных задач развития аэрокосмической отрасли. Наиболее перспективными с этой точки зрения являются сплавы систем Al–Mg-Li и Al–Li–Cu–Mg. Однако они относятся к стареющим системам и отличаются сложностью фазовых и структурных превращений в процессе прокатки листового материала. Поэтому широкое применение алюминий-литиевых сплавов, особенно сплава системы Al–Mg-Li (оригинальный сплав 1420 – самый легкий (плотность 2,47г/см3), коррозионностойкий, с повышенным модулем упругости и достаточно высокой прочностью) сдерживается из-за низкой технологичности при прокатке до тонких металлических листов 0,3-0,5 мм.

При использовании нового конструкционного материала в изделиях любого назначения необходимо глубокое знание его свойств, чтобы

предвидеть его поведение в разных условиях. Совокупность термоаналитических методов позволяет получать более полную информацию о составе и структуре, а также дают возможность оценить изменение прочностных свойств готового изделия. Термоаналитическое сопровождение технологических процессов является инновационным и требует разработки соответствующих методов и нового приборного оснащения.

В связи с этим целью работы является предварительный выбор проходов при прокатке листового материала на примере систем Al–Mg-Li по данным регистрации тепловых эффектов и выбор параметра, контролирующего критические значения потери устойчивости кристаллической решетки в виде ряда значений согласованных со стационарными температурами, характеризующих периодическое преобразование структуры.

Энергетика процессов пластического деформирования, сопровождается тепловыми эффектами. Так, в проведенных опытах из холоднокатаного листа системы Al-Li-Mg сплава были вырезаны образцы шириной 30 мм и длиной 50 мм в количестве 28 штук для последующей холодной прокатки на лабораторном прокатном стане КВАРТО К220-75/300. Каждый образец после индивидуального нагрева по режиму метода ИДС был прокатан за четыре прохода с фиксированием значений толщины и усилия прокатки. По полученным результатам построены графики зависимости усилия прокатки от температуры ИДС. Также в нашем случае каждый образец после четвертого прохода прокатки был испытан на микротвердость вдавливанием индентора на приборе ПМТ-3. Выбранная нагрузка на индентор составила100 грамм. Значения микротвердости усреднены по 4 замерам, предпринятым для каждого образца. По результатам построен график зависимости микротвердости от температуры ИДС.

В опытах с образцами фиксируется скорость изменения температуры и две переменные: температура и время. По методу термического анализа (ДТА) изменяются температура и время, в методе изотермического дискретного сканирования (ИДС) температура и время всегда постоянны в каждом акте испытания. И они могут быть заданы по условию эксперимента, чтобы служить ориентиром для выбора соответствующих параметров обработки.

Полученные графики в результате исследований, имеют характерные особенности в виде состоятельности пиков тепловых эффектов относительно дискретной оси температур, что позволяет строго и точно привязаться к сетке стационарных температур, например: 171,5; 514,5°С.

Структурные превращения ожидаются в окрестности этих температур, периодичность между ними составляет 343°С с небольшим смещением. Данная температура является характеристикой изменений вещества, спонтанного стремления к стационарности температур по интервалам и образованию ожидаемого геометрического центра и начала в каждом интервале. Это служит ориентиром для выбора соответствующих температур тепловой обработки листового материала системы Al-Li–Mg перед прокаткой.

Установлена явная периодичность зависимости усилия прокатки и микротвердости образцов от их температуры ИДС, которые хорошо согласуются с периодичностью относительно стационарных температур (Tπ) = 171,5 - 514,5 - 857,5 - 1200,5 - 1543,5 - 1886,5°С... [1].

Однако требуется подготовка и отработка новых методик, сочетание ИДС и ДТА с оптическим и рентгеноструктурным методами анализами, а также с физико-механическими способами определения плотности и свойств веществ, и материалов. Их применение значительно упрощает обработку результатов в связи с привязкой к интервалам стационарных температур и повышает точность оценки величин и их дисперсия будет минимальная [2].

Список используемых источников

1. Дорошко, Г.П. Введение в температурный анализ свойств материала. [Текст] / Г.П. Дорошко // Самарск. гос. арх.-строит. ун.-н.–Самара, 2007.–396 с.

2. Mikheev, V.A. A new method of metallic alloys producing with interphases, which re formed coherent coupling of compounds' atoms [Текст] / V.A. Mikheev, G.P.Doroshko // Key Engineering Materials, 2016.

## Повышение качества разработки и проектирования современных наукоемких РЛС на основе аддитивных технологий

Аликина А.С., Черевиченко А.В.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Епанешникова И.К.
МАИ, Москва
Ruzhullya@gmail.com

Современные бортовые РЛС, входящие в состав бортовых авиационных комплексов, являются практически единственным всепогодным источником информации, снабжающим мониторинг окружающего пространства с управляемой детальностью. В настоящее время бортовые РЛС (БРЛС) с синтезированием апертуры позволяют решать задачи видовой разведки (вести съемку земной поверхности в различных режимах), селекции мобильных и стационарных целей, анализа изменений наземной обстановки, производить съемку объектов, укрытых в лесных массивах, а также обнаруживать заглубленные и малоразмерные морские объекты.

В связи с этим представляет интерес рассмотрение комплекса прикладных и технологических проблем, с которыми приходится встречаться в процессе разработки БРЛС нового поколения.

Следует отметить, что при разработке таких сложных изделий как БРЛС, применяются десятки и сотни различных технологий, что увеличивает срок изготовления БРЛС.

Большое количество ошибок в проектировании РЛС появляется на этапе разработки конструкторской документации и макетирования. Введение аддитивных технологий на этапе проектирования РЛС позволит значительно снизить количество ошибок при производстве. Это происходит вследствие главного преимущества аддитивного производства по сравнению с традиционными процессами - при изготовлении ряда деталей можно освободиться от ряда технологических процессов.

Сравнивая традиционную технологию изготовления моделей с аддитивной, можно сделать следующие выводы: в зависимости от сложности оснастки и геометрии детали происходит сокращение времени получения первой отливки с применением системы аддитивного производства от 2 до 10 раз. Кроме этого, использование аддитивных технологий исключает ошибки в геометрии отливки, если они отсутствуют в модели детали, используемой при проектировании оснастки, позволяет изготавливать изделия со сложной геометрией, экономит сырье, увеличивает мобильность производства, позволяет ускорить обмен данными, а также в целом улучшает свойства готовой продукции.

Изготовление модели детали с помощью аддитивных технологий составляет примерно 10% от времени изготовления традиционной технологией.

Применение аддитивных технологий значительно сократит время и средства при производстве РЛС, повысит качество разработки и проектирования современных наукоемких БРЛС.

Список использованной литературы:

1. Гвоздарев Р.С. Повышение качества проектирования и производства РЭС на основе разработки методических принципов снижения объёмов корректировок конструкторской документации: автореферат диссертации по машиностроению и машиноведению. - 2012

2. Довбыш В. М. Аддитивные технологии и изделия из металла / В. М.Довбыш, П. В. Забеднов, М. А. Зленко. - 2015.

## Тенденции развития технологий изготовления узлов и агрегатов турбин высокого давления ГТД

Андросович И.В.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Силуянова М.В.
МАИ, ОКБ Сухого, Москва
irishutka-mishutka@yandex.ru

Процесс эксплуатации ГТД связан с изменением зазора в проточной части, влияющим на ресурс. Как правило это изменение проявляется в виде возрастания зазора по мере увеличения эксплуатационного ресурса.

В 4 и последующих поколениях ГТД на торцах пера лопатки расположены накладки, а на корпусе устанавливаются надроторные вставки - зазор уменьшается, предусматривают реализацию повышения эффективности лопаточных машин.

Среди технологий, обеспечивающих уплотнение проточной части ГТД, помимо покрытий в турбине высокого давления, надроторных уплотнений, в кратко- и среднесрочной перспективе возможно применение аддитивных технологий. Внедрение аддитивной технологии изготовления лопаток турбин высокого давления или их элементов будет целесообразно только при наличии полуфабрикатов для аддитивной технологии, обеспечивающих выполнение производственных и эксплуатационных требований, при

наличии оборудования и рабочего инструмента (печатающих головок), обеспечивающих заданные требования точности. Оборудование для аддитивных технологий в целом приспособлено для гибкой переналаживаемости и смены объектов производства – на одной установке в одну смену могут быть изготовлены лопатки и их элементы для разных модификаций двигателей. Отдельным преимуществом аддитивных технологий, в т.ч. и для элементов турбин ГТД будет высокий коэффициент использования материала при изготовлении. При эффективном внедрении и обоснованном применении аддитивных технологий при производстве и ремонте узлов и агрегатов горячей части ГТД, возможно добиться повышения технико-экономических показателей на всех этапах жизненного цикла изделий.

## Лазерная сварка разнородных материалов

Арсланов А.А., Вулпе М.Н.
Научный руководитель — доцент, к.э.н. Курынцев С.В.
КНИТУ-КАИ, Казань
arslanov-2004@mail.ru

В последнее время все большее внимание уделяется изучению методов соединения разнородных материалов. Особое значение такие исследования имеют для аэрокосмической и авиационной отраслей, ввиду особых требований к свойствам используемых материалов. Наиболее широко используемыми соединениями разнородных материалов в данных сферах можно назвать соединения Ti-Al, Cu-Al, Fe-Al, а также их сплавов. Но сочетание отличной коррозионной стойкости, прочности, удельной плотности Ti и низкого веса и стоимости Al выделяет соединение данных элементов среди других.

Сварка Al и Ti методом лазерной сварки со смещением лазерного луча в сторону одного из компонентов выглядит наиболее совершенной. Именно этот вид сварки позволяет обеспечить оптимальный уровень тепловложения и минимальное время взаимодействия жидких фаз элементов, предоставляет способы регулирования диффузионных и тепловых процессов. Возможность регулирования данных процессов является необходимым условием получения качественного сварного шва, так как интерметаллиды AlTi, образующиеся при ненадлежащих параметрах сварки в больших количествах, обладают повышенной твердостью и хрупкостью по причине больших различий в свойствах Al и Ti (степень сходства с кислородом, температура плавления, значения теплопроводности, коэффициент линейного расширения, строение кристаллической решетки).

При проведении работы [1], сварка производилась встык посредством смещения лазерного луча в сторону алюминия, значения мощности и скорости лежали в диапазонах 4,2 кВт – 5 кВт и 70 мм/мин – 100 мм/мин соответственно.

В работе [2] сварка осуществлялось сквозным проплавлением при разных технологиях сварки. Было установлено, что химический состав образовывающихся интерметаллидов, их структура, толщина слоя на котором они образовываются зависят как от параметров лазерного луча (мощность луча – 1кВт, скорость сварки варьировалась от 10 м/мин до 50 м/мин), так и от взаимного расположения свариваемых элементов.

С помощью светового микроскопа и растрового электронного микроскопа с микроанализатором удалось изучить получившиеся макро- и микроструктуры, выяснить толщину и структуру получившихся интерметаллических слоев, выяснить их химический состав.

Результаты исследования свидетельствуют о том, что на толщину интерметаллического слоя и его состав, а значит и на надежность соединения, решающее влияние оказывает тепловложение лазера в процессе сварки и для большей надежности его следует уменьшить.

Добиться этого можно как, смещением лазера в сторону одного из компонентов, так и снижением мощности лазера, увеличением скорости сварки.

Литература.

1. Никулина А.А., Смирнов А.И., Туричин Г.А., Климова-Корсмик О.Г., Бабкин К.Д. Особенности строения сварных швов, сформированных лазерной сваркой разнородных сплавов на основе титана и алюминия - Металловедение и термическая обработка металлов, изд-во: ООО"Фолиум" (Москва).

2. Su-Jin Lee, Makoto Takahashi, Yousuke Kawahito, Seiji Katayama. Microstructural Evolution and Characteristics of Weld Fusion Zone in High Speed Dissimilar Welding of Ti and Al - International journal of precision engineering and manufacturing, Vol. 16, No. 10.

## Разработка технологии изготовления конструкции рамного типа для аэрокосмической отрасли

Беззаметнова Д.М., Яшин И.И.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Батраков В.В.
КНИТУ-КАИ, Казань
dashatoropcova@yandex.ru

Цель работы: обеспечение точности изготовления преформ методом направленной укладки пространственных рамных конструкций, качества преформы и обеспечение размеростабильности данного вида деталей.

В рамках данной работы:

- проведен анализ влияния настроечных параметров оборудования на точность изготовления преформы;
- разработана конструкция рамного типа;
- проведено экспериментальное исследование изготовления преформы на примере пространственной конструкции космического аппарата;
- проведено исследование влияния параметров выкладки и используемых материалов на механические свойства композита;
- подобран материал для изготовления пространственных конструкций рамного типа; изготовлены образцы масштабированной детали с повышенными механическими характеристиками.

Для изготовления преформы методом направленной укладки волокна конструкции рамного типа будет использована машина для укладки волокна. Машина представляет собой модифицированную швейную машину для производства сухих преформ из композитного материала. Суть процесса Tailored Fiber Placement заключается в укладке волокна по заданной траектории с пристегиванием его верхней и нижней нитью к подложке. Процесс реализуется за счет полностью управляемых «голов» и рамы, которая перемещается в осях x и y.

За основу была взята конструкция рамного типа космического аппарата с заданными размерами под отверстия для крепления оборудования. Ряд мероприятий, проведенных в данной работе, позволил получить преформы методом направленной укладки волокна с заданной точностью, что делает возможным сквозное проектирование детали и оснастки для ее изготовления. Так же данный метод позволяет обеспечить качество и стабильность изготовленной преформы методом направленной укладки волокна рамных конструкций и обеспечение размеростабильности данного вида деталей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках выполнения проекта с уникальным идентификатором RFMEFI57717X0262.

# Микроструктурное поведение титановых сплавов при ПТФ

Белов С.П.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Ковалевич М.В.
МАИ, Москва
sp_belov@list.ru

Для современных технологий требуются материалы, которые должны иметь низкую плотность, высокую удельную прочность, отличную коррозионная стойкость. В этом отношении титановые сплавы являются наиболее подходящими материалами и широко используются во многих отраслях, таких как аэрокосмическая, машиностроение, биомедицинская и другие.

Применение титановых сплавов позволяет снизить массу готовых изделий и повысить их качество. Однако технологии изготовления тонкостенных изделий из титана весьма сложны и трудоемки. Одним из недостатков титановых сплавов является пониженная технологическая пластичность, что требует обработки их в условиях сверхпластичности.

Наибольший интерес из процессов сверхпластической штамповки представляет пневмотермическая формовка (ПТФ). ПТФ – формообразование листовых заготовок с помощью избыточного давления газа при оптимальных температурно-скоростных условиях деформации.

Установлено, что сверхпластичность обычно достигается почти во всех поликристаллических материалах с мелкозернистой микроструктурой. Титановые сплавы также имеют большие удлинения без разрушения или образования шейки, при оптимальных режимах сверхпластической деформации. Эти режимы сверхпластического состояния, обнаруженные экспериментально многими исследователями, являются почти эмпирическими по своей природе. Известно, что для достижения сверхпластического состояния титановых сплавов необходимо выполнить условия: во-первых, средний размер зерна должен быть меньше 10 микрон, и эти зерна должны быть равноосны; во-вторых, температура нагрева, как правило, 0,5 Тпл, где Тпл - абсолютная температура плавления; наконец, скорости деформации должна быть в диапазоне от 10-4 до 10-2 с-1.

В промышленном применении соответствующих технологий поддержание данных условий, необходимых для оптимального сверхпластического состояния при ПТФ на всем этапе формоизменения, является очень сложной задачей. Поэтому процесс деформации осуществляется не при оптимальных условиях, а на вблизи оптимальных границах сверхпластического состояния, которые называются около сверхпластическими режимами, для которых микроструктура материала существенно изменяется в процессе деформации. По мере изменения микроструктуры напряжение, необходимое для деформирования материала, изменяется, соответственно, и реакция материала становится зависимой от истории загрузки в этом режиме сверхпластической деформации.

В последнее время большая часть исследований по изучению сверхпластического поведения титановых сплавов в основном сосредоточены на выявлении оптимальных режимов деформации для различных сплавов.

Для моделирования промышленных процессов изготовления важно разработать методику расчетов параметров, которая также учитывает основные изменения в микроструктуре материалов, происходящих при неоптимальных процессах сверхпластической деформации.

## Тепло-вакуумные испытания агрегатного модуля

Быстрянский А.А., Железнякова Ю.С.
Научный руководитель — Качалова И.В.
МАИ, Москва
kira956@yandex.ru

В докладе приведена методика тепло-вакуумных испытаний агрегатного модуля ракеты-носителя, который предназначен для формирования целевой орбиты полезной нагрузки, обеспечения необходимой ориентации в процессе пассивного полета, отделения полезной нагрузки с заданными параметрами движения и выполнения маневра увода с рабочей орбиты.

В процессе работы оборудование агрегатного модуля выделяет тепло. Для обеспечения работоспособности этого оборудования должен соблюдаться заданный тепловой режим, что требует наличия системы обеспечения теплового режима (СОТР). Повышение температуры изделий происходит под воздействием внешних и внутренних факторов, оно может быть, как непрерывным, так и периодическим, и апериодическим. При проведении наземных испытаний агрегатный модуль оборудуется габаритно-тепловыми макетами приборов (контейнера управления бортовыми системами, бортового цифрового вычислительного комплекса, гиростабилизированной платформой и т.п.), на которых установлены датчики температуры.

Целью тепло-вакуумных испытаний является отработка тепловых режимов модуля в условиях, имитирующих штатные – в полете, подтверждение достаточности проектных параметров СОТР и достаточности пассивных средств терморегулирования внешних элементов конструкции.

Методика проведения испытаний включает три этапа:

1. Подготовительный, на котором проводятся входной контроль, регистрации параметров датчиков, проверка систем управления и измерения, устанавливается тепловое состояние модуля.

2. Основной, на котором при включенных СОТР устанавливается температура и расход воздуха, фиксируются показания датчиков. Этот этап включает 5 режимов, на каждом из которых устанавливается подаваемая температура теплоносителя и расход воздуха.

3. Заключительный, на котором проводится дефектация изделия.

## Полный цикл производства сложных механических систем при помощи аддитивных технологий

Вистяж П.С., Пугачев И.А.
МАИ, Москва
kratos100500@gmail.com

В данной работе рассматривается процесс полного производственного цикла, при помощи аддитивных технологий.

Целью работы является популяризация и обозначение удобства и простоты проектно-производственного цикла с помощью технологии 3D-печати. Для достижения заданной цели были выделены основные пункты, показывающие принципы аддитивного производства.

1. Создание рабочей модели в CAD – системе.

- Проектирование модели собственноручно, с закладыванием индивидуальных особенностей
- Взятие за основу реальную модель которая была перенесена в CAD-систему по средствам лазерного сканирования
- Использование 3D модели взятой из открытой базы данных проектировщиков.

2. Изготовление функциональной модели для выявление дефектов незамеченных на этапе проектирования. Оценка функциональности изделия и его модернизация, при необходимости.

3. Производство конечного изделия, с функциональной составляющей как у модели для выявления дефектов, но с гораздо большей прочностью и качеством исполнения.

В ходе работы был представлен широкий спектр производственных возможностей современных аддитивных технологий, которые с каждым годом становятся все доступнее для большинства потребителей среднего уровня достатка. Постепенна сложный и дорогостоящий процесс поштучного и мелкосерийного производства будет вытеснен. Всего за несколько лет, качество 3D-печати возросло на порядок. Технологии аддитивной печати не стоят на месте, их стремительное развитие говорит о том, что вскоре часть мелкосерийного производства приобретет совершенно иной вид.

## Метод лазерной сварки разнородных металлов

Вулпе М.Н., Арсланов А.А., Колесников Д.Н.
Научный руководитель — доцент, к.э.н. Курынцев С.В.
КНИТУ-КАИ, Казань
god.fd@list.ru

Соединение двух разнородных металлов в различных конструкциях является актуальной задачей, решение которой расширит конструкционные возможности. Особый интерес представляет собой соединение алюминия с другими металлами, так как такое соединение способно в большинстве случаев облегчить конструкцию. Так, алюминий и титан, легкие металлы, находят применение во многих сферах, особенно в аэрокосмической, в основном для облегчения, что приведет к меньшему расходу топлива и требовательности двигателя.

Существует несколько видов сварки для получения соединения двух разнородных металлов: диффузионная сварка, сварка взрывом, лазерная сварка и др. Особым преимуществом обладает лазерная сварка, имеющая высокую концентрацию энергии, высокую точность и скорость, а также возможность регулирования самого процесса, что позволяет вкладывать необходимое количество энергии в единицу объема для минимального влияния на металл. Основная проблема сварки двух разнородных материалов – появление интерметаллидной (ИМ) прослойки, которая повышает хрупкость соединения. Интерметаллиды негативно влияют на механические свойства соединения в сравнении со свойствами самих металлов, поэтому решением данной проблемы будет сведение ИМ слоя к минимуму.

Несколькими авторами был предложен метод лазерной сварки, в котором производится отступ сфокусированного лазерного луча от границы соединения металлов на один из металлов. Так, в исследовании [1], при сварке алюминия и титана лазерный луч фокусировался на алюминии, мощность лазера, скорость и отступ были подобраны таким образом, что плавился только алюминий, титан оставался в твердой фазе, однако на краях титановой заготовки произошло перемешивание металлов, что привело к обособленным ИМ областям. Сварка проводилась при высокой мощности и скорости, что привело к уменьшению толщины ИМ прослойки, повышение скорости сварки еще уменьшило толщину прослойки. Авторы пришли к выводу, что для уменьшения ИМ слоя необходимо уменьшить тепловложение путем уменьшения мощности лазера и увеличением скорости сварки и отступа. В работе [2] алюминий сваривался с титаном, фокус лазерного луча был смещен на титан. В данной работе исследовался сварочный шов и его свойства в зависимости от мощности, скорости и отступа. В зависимости от тепловложения сварка происходила в двух режимах: диффузионном и с образованием парогазового канала. Первый режим характеризуется меньшим тепловложением, профиль ИМ слоя получился

прямолинейным. Во втором режиме слой - криволинейный, также произошло перемешивание расплавленных металлов, наблюдалось наличие пор, толщина ИМ слоя больше, но в целом небольшая. Свойства шва, имеющего профиль криволинейного ИМ слоя, получились хуже в сравнении с прямолинейным. В работе [3] по сварке алюминия и стали лазерный луч фокусировался на стали. Фокусировка луча на стальной пластине вместо алюминиевой является предпочтительной, поскольку она позволяет лучше контролировать процесс. Также отмечались преимущества высокой скорости сварки, что приводило к более тонкому ИМ слою.

Таким образом, для получения соединения с хорошими свойствами необходимо уменьшать ИМ слой, который негативно влияет на качество шва. Для сварки разнородных металлов можно использовать лазерную сварку с отступом от стыка. Толщина ИМ слоя зависит от параметров сварки, таких как мощность лазера, скорость сварки и отступ. Для уменьшения толщины нужно уменьшить тепловложение, то есть можно уменьшить мощность лазера, увеличить скорость сварки и увеличить отступ. Подбирая значения данных параметров, можно получить тонкий ИМ слой, влияние которого на сварной шов будет минимальным, что говорит о хорошем качестве сварного соединения двух металлов.

## Влияние обратимого легирования водородом на структуру и свойства образцов из титанового сплава Ti-6Al-4V, полученных методом селективного лазерного сплавления

Герман М.А., Бачеева А.В., Макаров Ф.В.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Скворцова С.В.
МАИ, Москва
ferrarigerman@gmail.com

В работе были исследованы структура и свойства образцов из титанового сплава Ti-6Al-4V (ВТ6), полученных при помощи технологии послойного селективного лазерного сплавления (СЛС), после проведения термоводородной обработки (ТВО). В настоящее время аддитивные технологии крайне быстро развиваются и находят свое применение в различных отраслях промышленности, таких как авиация, машиностроение и медицина.

Образцы были получены на установке Concept Laser M2 Cusing с использованием металлического порошка из сплава Ti-6Al-4V фирмы Delirium со средним размером частиц 15-30 мкм.

На первом этапе была исследована структура на образцах в исходном состоянии после СЛС, а также измерена их твердость и плотность. Структура образцов представлена мартенситом, что обусловлено высокой скоростью отвода тепла из зоны спекания гранул. Твердость по сечению образцов неоднородна и колеблется в интервале значений от 35 до 38 ед. HRC. Это, возможно, связано с разными условиями охлаждения слоев в процессе «выращивания» образцов. Также, методом гидростатического взвешивания была измерена плотность образцов, которая составила 4,42 г/см^3, что сопоставимо с плотностью полуфабрикатов из сплава ВТ6, полученных по традиционной технологии.

На кафедре «МиТОМ» на протяжении многих лет проводятся исследования по влиянию обратимого легирования водородом на структуру и механические свойства титана и его сплавов [1,2]. Имея положительный опыт [2] влияния ТВО на преобразование структуры и получение требуемого уровня свойств, на следующем этапе работы была оценена возможность преобразования структуры и управление механическими свойствами 3D-образцов с помощью ТВО.

Наводороживающий отжиг (НО) 3D-образцов из сплава Ti-6Al-4V проводили до концентрации 0,6% по массе при двух температурах: 850С, что соответствовало окончанию процесса наводороживания в β-области, и 750С, что соответствовало (α+β)-области после

завершения процесса. НО в (α+β)-области был совмещён с обычным отжигом. Образцы нагревали в вакууме до 820С, выдерживали 2 часа, затем понижали температуру до 750С и начинали процесс наводороживания. После завершения поглощения водорода образцы выдерживали при температуре НО и равновесном давлении водорода в течение 3 часов для завершения диффузионных процессов. Охлаждение до комнатной температуры проводили со скоростью 1 К/с.

Введение в образцы 0,6%Н при температуре 850С и последующее охлаждение до комнатной температуры приводит к формированию β-структуры с небольшим количеством мартенсита.

Наводороживание в двухфазной области приводит к формированию трёхфазной (α+α2+β)-структуры, в которой присутствует мартенсит, что может быть связано с химической неоднородностью порошка.

Окончательной операцией ТВО является вакуумный отжиг (ВО), который необходим для снижения содержания водорода в сплаве до безопасных концентраций и преобразования структуры. Для проведения ВО было выбрано несколько режимов:

1) t=820С, 4ч.; 2) t=625С, 8ч.; 3) t=550С, 3ч., нагрев до 820С, 4ч.

Проведённые структурные исследования показали, что образцы, наводороженные при температуре 850С после ВО имеют (α+β)-структуру. Так как после НО в структуре присутствует мартенсит, то при ВО α-фаза наследует его пластинчатую морфологию. При ступенчатом и низкотемпературном ВО наблюдается измельчение структуры, которое приводит к увеличению твёрдости от 34 до 39 ед. HRC.

Высокотемпературный и ступенчатый ВО образцов, наводороженных в (α+β)-области, приводит к формированию равновесной (α+β)-структуры. После низкотемпературного ВО формируется трёхфазная (αдег+β+α2)-структура. Дисперсность структурных составляющих увеличивается с понижением температуры ВО. Однако это практические не сказывается на твёрдости, которая составляет 34–35 ед. HRC.

На заключительном этапе были проведены механические испытания. Анализ результатов показывает, что образцы в исходном состоянии имеют прочность порядка 1130 МПа, что объясняется их мартенситной структурой. Сопоставимый уровень прочности даёт режим ТВО с низкотемпературным ВО. Область наводороживания большой роли не играет. ТВО с высокотемпературным и ступенчатым ВО обеспечивает значения предела прочности 920–940 МПа, которые сопоставимы с прочностью для отожжённого деформированного полуфабриката из сплава ВТ6 (Ti-6Al-4V) (900–1050 МПа).

Разброс значений прочности, относительного удлинения и ударной вязкости, полученных после испытания двух образцов, незначителен. Значения относительного сужения для двух испытанных образцов, обработанных по одинаковому режиму, отличаются почти в два раза, что может быть связано с несовершенством 3D-печати за счёт образования микропористости, поскольку анализ структуры образцов в месте излома не выявил существенной разницы.

Литература

1.Ильин А.А. Механизм и кинетика фазовых и структурных превращений в титановых сплавах. – М.: Наука, 1994. – 304 с.

2.Водородная технология титановых сплавов / А.А. Ильин, Б.А. Колачев, В.К. Носов, А.М. Мамонов; под общей редакцией чл.-кор. РАН А.А. Ильина. – М.: МиСИС, 2002. – 392 с.

## Методика расчета корпуса авиационного ГТД на непробиваемость в случае обрыва лопатки

Голиков В.А.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Лепешкин А.Р.
МАИ, Москва
Vladimir.golikov94@gmail.com

Испытание на обрыв лопатки вентилятора является неотъемлемой частью проверки корпуса авиационного газотурбинного двигателя на прочность. Благодаря этому испытанию, можно определить необходимую толщину корпуса, однако стоимость такой процедуры велика, так как впоследствии корпус и ротор вентилятора приходят в полную негодность. В связи с этим необходимо искать такие способы определения толщины корпуса, которые позволят проводить испытания корпуса вентилятора на прочность как можно меньше число раз.

Одним из таких способов является известная методика расчета корпуса на непробиваемость. Она основана на определении коэффициента запаса прочности корпуса при попадании в него объекта, в данном случае оборвавшейся лопатки, с использованием исходных параметров: масса и окружная скорость центра масс объекта, предел прочности материала корпуса и др. Основной недостаток данной методики состоит в том, что в расчетах используются постоянные эмпирические коэффициенты, которые приводят к завышенному значению толщины корпуса.

Данную проблему можно решить с помощью более совершенной разработанной методики расчета параметров корпуса с использованием переменных эмпирических коэффициентов, зависящих от кинетической энергии оборвавшейся лопатки, приведенной в данной работе. Для ее разработки были проанализированы результаты успешных испытаний различных корпусов авиационных ГТД на непробиваемость и выполнена проверка известной методики на достоверность. Полученные при проверке коэффициенты запаса прочности не соответствовали результатам испытаний. К примеру, при большом запасе прочности, при котором корпус не должен был получить повреждений, образовалась трещина.

Таким образом, на основе опытных данных были построены графики зависимостей эмпирических коэффициентов от кинетической энергии оборвавшейся лопатки, которые позволяют более точно определить параметры корпусов по разработанной методике расчета.

## Повышение производительности и обеспечение качества ответственных поверхностей деталей машин за счёт применения комбинированной режуще-деформирующей обработки

Грибкова Л.А.
Научный руководитель — к.т.н. Ганзен М.А.
РГАТУ им. П.А. Соловьёва, Рыбинск
bearmila@mail.ru

В настоящее время в машиностроении наблюдается вытеснение традиционных конструкционных материалов, таких как сталь и чугун, новыми сплавами на основе цветных металлов.

Однако большинство цветных сплавов имеют неудовлетворительную износостойкость из-за невысокой твёрдости. В настоящее время для увеличения износостойкости рабочих поверхностей деталей широко используется нанесение различных покрытий. Недостатком такого подхода является склонность нанесённых покрытий к отслаиванию (при низкой

адгезии с основанием), растрескиванию и выкрашиванию, нестабильность свойств покрытий, что ограничивает их применение.

Известно, что большинство цветных металлов хорошо упрочняются деформационными методами. При этом верхний слой материала получает повышенную твёрдость с плавным переходом к неупрочнённой сердцевине. При использовании деформационного упрочнения, в поверхностном слое образуются сжимающие остаточные напряжения, что благоприятно сказывается на сопротивлении усталостным нагрузкам. Глубина упрочнённого слоя зависит от режимов обработки и может варьироваться в широких пределах.

Применение комбинированной режуще-деформирующей обработки позволяет повысить точность изготовления, а также улучшить такие показатели качества поверхностей деталей, как шероховатость и волнистость, наклёп и остаточные напряжения; при одновременном повышении производительности процесса. Таким образом, целесообразно создание методики применения режуще-деформирующей обработки на примере технологической операции растачивания отверстий в корпусных деталях из алюминиевых сплавов.

## Моделирование и имитация теплофизического воздействия космоса на искусственные спутники земли

Губарев Н.И.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Хопин П.Н.
МАИ, Москва
gubarev.n.i@gmail.com

С развитием космической техники особое значение приобретает проблема обеспечения надежности космических аппаратов (КА). Одним из основных факторов, определяющих надежность и долговечность КА, является стабильность его теплового режима [1]. Электронная аппаратура современных спутников и космических кораблей имеет довольно узкий рабочий температурный диапазон. Отклонение температуры от этих пределов может привести к изменению характеристик аппаратуры [1].

Основными факторами, влияющими на КА в космическом пространстве, являются:

1. Космический вакуум.
2. Излучение Солнца.
3. Излучение планет.
4. “Чернота” и “холод” космического пространства.

Установлено, что гарантировать работоспособность всего комплекса систем КА, надежность совместного функционирования полезной нагрузки, систем регулирования и защиты в условиях космического полета могут только комплексные испытания узлов, систем и аппарата в целом, проводимые с максимальным приближением к этим условиям – комплексному воздействию перечисленных неблагоприятных факторов [2].

Таким образом, экспериментальное моделирование тепловых режимов КА в условиях, максимально приближенных к натурным, сопряжено с большими техническими трудностями несмотря на то, что имитационная техника, существующая в реальном воплощении или в технических проектах, позволяет воспроизводить каждый из отмеченных факторов с достаточной точностью [3]. Сложности вызваны тем, что необходима техническая организация совместной работы имитационных систем и испытываемого объекта. Поэтому важное значение приобретают приближенные методы моделирования внешнего теплообмена [3,4,5].

Рассмотрены приближенные методы моделирования внешнего теплообмена в тепловакуумных установках, оснащенных системами вакуумирования и криогенными экранами, имитирующими космический вакуум и идеальные поглощательные свойства космического пространства.

Литература

1. Мишензников Г.Е., Чувилькин А.В., Сидоров А.В., Винокуров Ю.Н. Натурные испытания многофункционального электропроводного терморегулирующего покрытия для космических аппаратов. // Конверсия в машиностроении. 2007. №4-5. с. 74-77.

2. Кравченко С.В., Нестеров С.Б., Романько В.А., Тестоедов Н.А., Халиманович В.И., Христич В.В. Комплексные системы для испытания и отработки летательных аппаратов. // Вакуумная техника и технология. 2012. Т.22. №4. с.213-230.

3. Проблемы тепловакуумной отработки КА [Электронный ресурс]. URL: http://mybiblioteka.su/tom2/8-121574.html (дата обращения 22.02.2018).

4. Палешкин А.В. Исследование и разработка методов моделирования внешнего теплообмена космических аппаратов с помощью инфракрасных источников излучения: дисс. канд. техн. наук. МАИ. Москва, 2011.

5. Палешкин А.В., Мамедова К.И. Моделирование расчетных внешних тепловых нагрузок к поверхности космического аппарата с помощью инфракрасных нагревателей. // Труды МАИ. 2016. № 85. С. 6.

## Результаты исследования качества поверхностного слоя при использовании процесса глубинного шлифования на операциях обработки хвостовиков лопаток турбины

Двинянинова Л.В.

Научный руководитель — профессор, к.т.н. Волков Д.И.

РГАТУ им. П.А. Соловьёва, Рыбинск

lvd0@yandex.ru

Развитие технологии машиностроения невозможно без совершенствования методов обработки и оптимизации параметров технологического процесса. На операциях глубинного шлифования в производственных условиях всегда существует необходимость обеспечения высокой производительности, в то же время требования к качеству деталей ГТД остаются очень высокими. Для обеспечения точности и качества поверхностного слоя при обработке хвостовиков лопаток турбины обращают внимание прежде всего на точность, шероховатость поверхности, физико-механическое состояние (наклеп, остаточные напряжения).

Реализация процесса глубинного шлифования производилась на двухшпиндельных плоскошлифовальных станках с программным управлением мод. SS-013, SS-013L и SS-013D производства фирмы ELB-Schliff (Германия). На станках указанных моделей профиль хвостовика лопатки обрабатывается одновременно двумя кругами по заданной программе. Правка круга осуществляется алмазным роликом перед каждым чистовым проходом. Обработка проводилась высокопористыми кругами 3 500x25x203 24AF120G12V (24А10ПВМ112К5 П40-20). Так как процесс обработки сопровождается высоким нагревом, в станках применяется система охлаждения с принудительной подачей жидкости.

Глубинное шлифование, осуществляемое по трехпроходному варианту на режимах обработки, имело общее время цикла 18 мин. Обработке за один цикл подвергались 4-е детали, а общая длина шлифования составляла 180 мм. В результате исследования точности обработки было выявлено, что глубинное шлифование обеспечивало отклонение размеров по роликам от 1-ой до 4-ой лопатки в пределах 8 мкм, конусность по роликам 5 мкм; разношагость в пределах 2-7 мкм; непрямолинейность по зубу 5 мкм. Все размеры элементов "елочного" замка выдерживались в допуске.

Появление на шлифованной поверхности после первого прохода следов так называемого "дробления" (тепловые дефекты), причиной появления которых являются локальные колебания температуры в процессе обработки. Ухудшение режущей способности круга приводит к повышению интенсивности тепловыделений в зоне контакта и нарушению

теплообмена на обрабатываемой поверхности, которое может быть ликвидировано путем снижения режимов шлифования и улучшением охлаждения зоны контакта, а также восстановлением режущей способности круга.

Шероховатость рабочей поверхности определяет работоспособность замкового соединения в условиях теплонапряженного и сложного циклического нагружения, что обуславливается стабильностью процесса. Исследование шероховатости поверхностей замка показало, что высота микронеровностей находится в пределах 0,4-0,8 мкм, что существенно меньше требований чертежа и высоты микропрофиля.

По результатам экспериментальных исследований при глубинном шлифовании обеспечивается повышение точности обработки и стабилизируются получаемые отклонения, достигая практически полного соответствия поля допуска и поля рассеяния размеров. А так же устойчиво формируются сжимающие остаточные напряжения величиной 300-500 МПа, которые на глубине 40-50 мкм переходят в незначительные растягивающие с максимальной величиной до 100 МПа. Преимущество такого процесса является малый разброс геометрических показателей и отсутствие многократного цикла нагрева и охлаждения.

## Улучшение массово-прочностных характеристик силовых элементов двигательной установки за счёт внедрения аддитивных технологий

Дзгоев Т.Р.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Силуянова М.В.
МАИ, Москва
robertovich3101@gmail.com

Корпусные детали двигателей летательных аппарата имеют весьма сложную геометрическую форму, делающую изготовление цельных образцов методом литья или механической обработки невозможным или исключительно дорогостоящим. Как следствие, детали приходится изготовлять из нескольких составных частей, подлежащих сварке в единое целое. Именно сварочные швы, как правило, оказываются слабым звеном за счет нарушения однородности структуры материала или оксидации при сварке.

Аддитивное производство же не ограничено геометрической сложностью изготовляемых деталей – практически любая форма может быть выполнена без необходимости последующей сборки или сварки.

Повышение прочности конструкции происходит за счет отсутствия сварных швов. Соответственно при изготовлении корпусных деталей изготовленных на 3D принтере, прочность силовых элементов двигателя повысится

на 5-10 %.

Одной из главных задач в авиа- и ракетостроении является уменьшение веса силовой установки. С начала 2010 года интенсивно начали развиваться технологии формирования трёхмерных объектов не путём удаления материала (точение, фрезерование, электроэрозионная обработка) или изменения формы заготовки (ковка, штамповка, прессовка), а путём постепенного наращивания (добавления) материала.

В 2015 году были проведены работы по оптимизации силового элемента энергетической установки космических кораблей нового поколения, по результатам которых было выявлено, что переход от классического метода изготовления деталей к использованию 3D печати значительно уменьшает сроки изготовления, а также способствуют уменьшению веса детали до 35%.

Применение аддитивных технологий в авиастроении позволяет решить сложные технологические проблемы. Существующие технологии механической обработки имеют ряд технологических ограничений. Однако, сквозное цифровое проектирование и производство,

использующееся для выпуска металлических изделий со сложными внутренними структурами и полостями, позволяет эффективно их преодолевать.

Развитие аддитивных технологий в сфере авиа- и ракетостроении способствуют решению ряда вопросов, которые раньше не могли быть решены при помощи классического метода изготовления деталей.

Основные задачи, решаемые с помощью технологий 3D-печати, можно условно разделить на три группы:

- быстрое создание прототипов, ускоряющее процесс разработки изделий;
- создание конечных функциональных изделий сложной геометрии, легковесных конструкций, функционально интегрированных деталей;
- создание оснастки для литьевых процессов — пресс-форм для литья пластиков, мастер-моделей для литья металлов по выплавляемым и выжигаемым моделям, форм для литья металлов в песчано-глинистых формах.

При применении всего ряда возможностей 3D-печати по предположительным оценкам удалось добиться снижения массы на 25-30% и увеличения прочности на 10-15%.

## Исследование процесса формирования просветляющего покрытия для оптико-электронных приборов и систем

Довгань Д.Ю.
Научный руководитель — профессор, д.ф-м.н. Лигачев А.Е.
МАИ, Москва
dovgan.rampage1994@yandex.ru

При разработке конструкций оптико-электронных приборов и систем приходится решать задачу, связанную с повышением коэффициента пропускания оптической системы. Для этого формируются тонкопленочные просветляющие покрытия нанометровой толщины из диэлектрических материалов на поверхности оптических элементов.

В данной работе анализируется несколько возможных путей ее решения:

1) Создание однослойного просветляющего покрытия., эффективного только для расчетной длины волны λо на узком участке спектра. Поэтому однослойное просветление можно считать избирательным.

2) Формирование двухслойного просветляющего покрытия. С помощью двухслойной пленки из диэлектрических материалов нанометровой толщины можно получить отражение близкое к 0% в узкой области спектра, либо расширить спектральную область минимального отражения.

3) Необходимость расширения спектральной области пропускания света оптическими приборами и системами послужила причиной перехода к многослойным неравнотолщинным просветляющим покрытиям. Формирование многослойных просветляющих покрытий позволяет получить равномерное снижение коэффициента отражения оптической системы в широкой области спектра и достичь значения отражения порядка 0,5%.

4) Наиболее перспективным способом расширения спектральной области пропускания оптических приборов и систем является нанесение комбинации из двух или трех многослойных систем просветляющих покрытий на одну подложку. Системы состоят из слоев равной оптической толщины. Каждой системе соответствует свой максимумом пропускания для рабочих длин волн λо. Применение данного способа позволяет достичь увеличения спектральной области пропускания и снизить величину побочных максимумов, что положительным образом сказывается на оптических характеристиках оптической системы.

Выбор просветляющего покрытия для создания высокоэффективных оптико-электронных приборов и систем зависит от следующих факторов:

1) От оптической схемы прибора.
2) Марок оптических стекол, применяющихся для создания оптического прибора.
3) Количества поверхностей, через которые проходит световой поток.
4) Эксплуатационных условий, в которых используется прибор.

## Применение газифицируемых моделей при литье заготовки «Фланец» в целях энерго- ресурсосбережения

Драницина Е.А.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Куртаева Ф.Н.
КНИТУ-КАИ, Казань
zhenya.kai.91@mail.ru

«Фланец» служит для крепления съемной заглушки, закрывающей смотровые окна на внешней оболочке газотурбинного двигателя НК-16СТ. Деталь изготавливается из стали 10Х18Н9БЛ.

Процесс литья по газифицируемым моделям из пенополистирола по точности близок к литью по выплавляемым моделям, а по экономичности превосходит литье в сырые песчаные формы.

Предлагаемый способ предполагает изготовление газифицируемой модели и использование песчаных форм в отличие от штатного способа литья по выплавляемым моделям. Газифицируемая модель не удаляется из формы, а остается, выгорая в процессе ее заливки сплавом. Снижение размерной точности получаемых отливок находится в пределах допустимых. [1].

Технология литья по газифицируемым моделям отливки «фланец» состоит из следующих этапов:

1. Изготовление газовой модели из полистирола.

Полистирол предварительно проходит предвспенивание в автоматическом предвспенивателе,затем при помощи пистолета-распылителя под давлением 0,2 – 0,35 МПа задувается в пресс-форму. После модель спекается в автоклаве в интервале температур 110-120°С [2].

Пенополистирол должен обладать следующими свойствами по ГОСТ 20282-86:

- при плотности 20 – 30 кг/м³ иметь достаточную технологическую прочность (0,1 – 0,2 МПа), чтобы сохранять размеры и конфигурацию моделей в процессе их изготовления, хранения, транспортирования и формовки;
- на всех стадиях технологического процесса иметь минимальную и стабильную усадку (0,15 – 0,2%);
- обладать достаточной скоростью газификации, чтобы заливаемый металл успевал заполнять полость формы до начала его затвердевания;
- при газификации разлагаться с минимальным содержанием коксообразующих продуктов во избежание появления засоров в отливках.

Данным требованиям удовлетворяет следующая марка «ПСВ-ГМ». Свойства полистирола марки «ПСВ-ГМ» по ГОСТ 20282-86: диаметр гранул основной фракции, 0.4-0.63мм; содержание основной фракции,91%; массовая доля порообразователя,5.0%; массовая доля остаточного мономера, 0.2%; относительная вязкость 1.8; кажущая плотность полистирола, 35кг/ м³; разрушающее напряжение при статическом изгибе, 2.2 (0.22)кгс/ см² (МПа).

2. Окраска модели противопригарным покрытием.

Противопригарное покрытие выполняет две функции: защищает отливку от пригара (при заливке чугуна и стали); предохраняет от образования грубой поверхности в результате неравномерного уплотнения смеси. Рекомендуется наносить слой покрытия толщиной 0,6 -

1,0 мм. Нами рекомендуется использование быстросохнущего противопригарного покрытия ППУ-1 на основе термообработанного маршалита. Данное покрытие обладает сверхвысокой газопроницаемостью, диапазон его рабочих температур до 1600°С, проявляет хорошее сцепление с любой поверхностью.

3. Формовка модели в опоку на вибростоле.

Формовка модели производится в специальной опоке на вибростоле с постепенной засыпкой песка. Под воздействием горизонтальной и вертикальной вибрации песок становится текучим и заполняет собой все каналы и полости модели. В качестве формовочных материалов применяют смешанные кварцевые пески двух фракций 0,315 и 0,16 мм в соотношении 1:1. Они обеспечивают повышенную плотность формы при заливке металлом [1].

4. Вакууммирование формы.

5. Заливка металла в форму.

Заливка происходит прямо в полистирольную чашу литника. Расплавленный метал при соприкосновении с полистиролом газифицирует его без остатка и образует отливку, замещая собой полистирольную модель. Рекомендуемые температура заливки формы модели с толщиной стенки 10–20 мм 1595–1605°С. Необходимо обеспечивать оптимально и максимально допустимую скорость заливки формы металлом, несоблюдение этих норм приводит к ухудшению качества отливки.

6. Охлаждение отливки, отрезка, очистка полученной отливки.

7. Контроль качества.

Контроль качества отливки производится с помощью люминесцентного, рентгенографического, магнитно-порошкового методов контроля.

Преимущества литья по газифицируемым моделям:

-снижение затрат на механическую обработку (повышенная точность размеров отливок);

- свободно можно видеть отливку в модели, промерять ее стенки;

-снижение трудозатрат в несколько раз;

-снижение потребления электроэнергии;

-возможность использования металла любого вида;

-более экологически безопасный метод литья [1].

Недостатки ЛГМ связанны с высокой стоимостью полистирола, возможность образования пригара, науглероживания нержавеющих и низкоуглеродистых сталей, дефектов попадания продуктов деструкции модели в поверхностные или внутренние слои стенки отливки [3]. В работе выработаны рекомендации по их устранению.

Список используемой литературы.

1..Шуляк В. С. Литьё по газифицируемым моделям. — СПб. НПО «Профессионал», 2007.

2. Дорошенко В. С., Бердыев К. Х. Газодинамический баланс в песчаной форме при литье по газифицируемым моделям // Литье Украины. - 2016. - № 4.

3.Рыбаков С. А. Инновационные возможности литья по газифицируемым моделям, состояние и перспективы этого метода в России // Литейщик России. №4, 2009, 45 с.

# Методика проведения и анализ результатов испытаний средств пожарной защиты самолета

Дугин Д.С.
Научный руководитель — Кириллин А.В.
МАИ, Москва
stalkershyxow@mail.ru

Данная работа посвящена рассмотрению методики проведения испытаний средств пожарной защиты самолета Ил-76МД-90А и анализу результатов проведенных испытаний средств пожарной защиты других самолетов имеющих аналогичные системы с аналогичными системами с целью подтверждения соответствия их требованиям, предъявляемым к средствам пожарной защиты. Подобное конструктивное исполнение испытываемых отсеков или систем дает возможность переноса результатов испытаний, при наличии подобного типа испытаний в базе данных. Это позволит снизить количество испытаний, трудоемкость проведения испытаний и стоимость проведения испытаний средств пожарной защиты и дает возможность подготовить самолет Ил-76МД-90А более оперативно к этапу ГСИ. Для возможности проведения анализа было проведено обобщение испытаний по типу испытываемого объекта и системы.

Объектом испытаний являются средства пожарной защиты (СПЗ) самолета Ил-76МД-90А, обеспечивающие обнаружение, сигнализацию, локализацию и ликвидацию пожара в пожароопасных отсеках самолета в случае его возникновения на земле или в полете.

Система пожарной сигнализации предназначена для обнаружения пожара в пожароопасных отсеках и выдачи информации о его возникновении экипажу.

В ходе работы осуществлен анализ проведенных испытаний на основе методик приведенных в [1]. Результатом данной работы стал перенос результатов проведенных испытаний самолетов Ил-96-300, Ил-76 на самолет Ил-76МД-90А имеющий подобные отсеки. Результатом данного переноса можно считать снижение количества необходимых мероприятий для подготовки самолета к этапу ГСИ:

- Заменить летные испытания СПС на наземные испытания и выполнение технологической инструкцией, выполняемой через панель «Пожарная защита» контроля СПС.
- Сократить число испытаний СПТ до проведения одного наземного испытания и двух летных испытаний.
- Убрать испытания КМПЗ двигателя ПС-90 и за счет уже проведенных испытаний подобного отсека.
- Заменить испытания СПС ВСУ на штатную проверку системой проверки сигнализации пожара.
- Убрать испытания СПТ ВСУ ТА-12 за счет уже проведенных испытаний подобного отсека.

Окончательный список мероприятий необходимых для подтверждения средств пожарной защиты самолета Ил-76МД-90А:

- Наземная отработка СПС двигателя ПС-90А-76 и отсека ВСУ ТА-12А, наземные испытания на стойкость датчиков СПС.
- Испытания по пожаротушению одна наземная отработка и два полета по определению концентрации огнегасящего вещества.

Список использованной литературы

1. Александровская Л.Н., Кириллин А.В. Системный подход в обеспечении качества испытаний изделий авиакосмической техники. – М.:Изд-во МАИ, 2017. – 160 с.:ил.

# Использование аддитивной технологии в аэродинамических испытаниях ракетно-космической техники

Дудков К.В.
Научный руководитель — профессор, к.т.н. Астапов В.Ю.
МАИ, Москва
JDG90@rambler.ru

Космос и авиация всегда находились на вершине технического прогресса и использовали самые передовые технологии. Процесс испытаний в области аэродинамики за многие годы принципиально не изменился. Для организации «продувки» требуется: испытательный комплекс – аэродинамические трубы с изменяемыми скоростными потоками (числами Маха), модели в мельчайших деталях повторяющую геометрию будущего изделия, измерительными комплексами для фиксации параметров получаемых при испытании модели и квалифицированный персонал который сможет провести испытания и в дальнейшем обработать полученные исходные данные для технического отчета.

Для проверки теоретических расчётов необходимо изготовление модели будущего изделия. Испытание моделей в масштабе 1:1 позволяют получить максимально достоверные измерения, но имеется ряд ограничений: габариты изделия могут достигать нескольких десятков метров в длину и ширину, постройка испытательного комплекса для больших моделей является сложной инженерной задачей и значительных капиталовложений с непрогнозируемым сроком окупаемости.

Наибольший интерес представляют аэродинамические модели. Это сложное изделие, которое проектируют, а затем изготавливают в соответствии с требованиями конкретного испытательного комплекса. К модели предъявляются очень жесткие требования по геометрическому подобию и качеству поверхности. Изготовление аэродинамических моделей по традиционной технологии основано на механической обработке и является трудоемким процессом. Проанализировав перспективные технологические процессы, как альтернативный метода изготовления моделей был взят послойный принцип «выращивания» моделей. Выбран самый рациональный с точки зрения качества и себестоимости конечного продукта SLA (Stereolithography – стереолитография). Изготовлены несколько моделей которые принимали участие в испытаниях на разнообразных режимах. Для рабочей зоны трубы разработана дренажная модель в масштабе 1:100. Целью испытаний являлось экспериментальное определение распределения давления по поверхности головного обтекателя, а также внешнего давления в области наиболее крупных надстроек, установленных на модели.

Задачей испытаний модели являлось экспериментальное определение распределения коэффициента давления на поверхности головного обтекателя и в области надстроек при углах атаки (=0(, ±6(и (=0(для чисел M=0.8, 0.85, 0.9, 0.95, 0.98, 1.02, 1.07, 1.12, 1.17, 1.5, 2.0. Испытания проведены успешно и получены экспериментальные данные по распределению давления на поверхности модели.

# Импортозамещение иностранных материалов при изготовлении герметичных корпусов приемников излучения

Егоров Т.В.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Бажанов А.В.
НИИ ТП, Москва
mytim11@yandex.ru

Герметичный корпус приемника излучения предназначен для работы в составе приемника излучения (фотоприемного устройства), который является чувствительным элементом системы ориентации космического аппарата. Приемник необходим для получения излучения космических объектов и преобразования его в электрические сигналы, поступающие в блок управления аппарата. Приемник излучения, являясь элементом системы ориентации и располагаясь вне герметичного отсека, подвергается космическому излучению. Фотоприемный элемент приемника излучения работает в среде инертного газа, в связи с этим необходима высокая степень герметичности ($1{\cdot}10^{-6}$ л·мкм рт.ст./с).

Керамические и металлокерамические корпуса приемников излучения, производящиеся зарубежными организациями, соответствуют повышенным требованиям по перечисленным выше параметрам, однако, ввиду высокой ответственности изделий, которые комплектуются данным прибором, а именно различные ракетные комплексы, космические аппараты и пр., возникает необходимость принятия мер к импортозамещению.

На базе предприятия АО НИИ ТП был разработан металлокерамический корпус приемника излучения, качестве конструкционных материалов, для деталей которого были применены отечественные материалы: железо-никелевый сплав 29НК-ВИ. А в качестве изоляционного материала для платы применяется высокотемпературная керамика ВК94-1. Для обеспечения защитных и функциональных свойств прибора применяются металлические покрытия такие как: химическое никелирование (Хим.Н6) и золочение (Н3.3л3).

На предприятиях отрасли внедрена устаревшая технология изготовления корпусов приемников излучения, основанная на использовании клеевых соединений, которая уже не удовлетворяет современным требованиям потребителей приемников излучения по параметрам герметичности, и по газовыделению. Мы предлагаем использовать технологию изготовления герметичных металлокерамических корпусов излучения посредством конструкционной пайки.

Температурный интервал эксплуатации фотоприемных устройств находится в пределах от минус 60℃ до плюс 150℃ для пайки корпуса был выбран припой ПОС-61 ОСТ 4ГО 033.200 и аналогичная ему по теплофизическим свойствам паяльная паста Indium Sn62Pb36Ag2, широко применяемая при поверхностном монтаже ЭРИ на печатные платы. На фланец изделия предварительно наносили покрытие Хим.Н6, а затем облуживали сопрягаемые поверхности припоем ПОС-61. На металлизированное покрытие металлокерамической рамки и корпус наносится покрытие Н3.3л3, а затем сопрягаемые поверхности облуживаются припоем ПОС-61.

В ходе проведения работ исследовали влияние способы укладки дополнительного количества припоя на качество паяных соединений и предупреждения появления натеков припоя на наружные поверхности корпуса, для этого процесс пайки моделировали на примере соединения фланца с металлокерамической рамкой. По результатам макетирования изготовленны опытные образцы.

Проведенный после пайки рентгеновский контроль паяных соединений позволил установить, что поры в них практически отсутствуют, а испытания на герметичность показали, что уровень натекания паяных соединений по гелию не превышает ($1{\cdot}10^{-6}$) л·мкм рт.ст./с.

Внедрение технологии изготовления герметичных металлокерамических корпусов будет осуществлено в АО «НИИ ТП» для обеспечения предприятий отрасли требуемыми корпусами.

Литература:

1. Б.Н. Арзомасов, Т.В. Соловьева, С.А. Герасимов Справочник по конструкционным материалам / Под ред. Б.Н. Арзомасова, Т.В. Соловьевой – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 640 с.

## Разработка специального адгезивного покрытия рабочего стола FDM 3D-принтера для повышения качества печати изделий

Елисейкин Е.И.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Калачёв О.Н.
ЯГТУ, Ярославль
evg843529335@mail.ru

В современном машиностроении на этапе конструирования широко используются методы быстрого прототипирования (БП) для получения прототипа изделия в максимально короткие сроки.

Аддитивные технологии (АТ) в качестве технологий БП применяют главным образом на начальной стадии проектов – для воспроизведения геометрического образа изделия [1]. В настоящий момент для выполнения данной цели чаще всего используют различные типы 3D-принтеров.

Одной из распространённых АТ является технология Fused Deposition Modeling (FDM), в которой применяется нагревательная камера для разжижения полимера, подаваемого в систему в виде нити [2]. Принтеры, работающие по FDM-технологии, наиболее массово выпускаются многими производителями в количестве нескольких десятков тысяч единиц в год [1].

Однако существует ряд проблем, во многом осложняющих процесс эксплуатации подобного оборудования, одна из которых заключается в утрате адгезии между первичными слоями материала, формирующими основание объекта, поддерживающие структуры, и контактной поверхностью рабочего стола принтера [3]. Данная проблема во многих случаях является причиной нарушения геометрии изготавливаемого изделия или прекращения процесса печати вследствие отлипания изделия от рабочего стола принтера, что приводит к росту количества брака.

В качестве средств повышения адгезии контактной поверхности рабочего стола различными фирмами выпускаются специальные покрытия, выполненные в виде пленок, силиконовых и ламинирующих пластин [4], дополнительно обработанных боросиликатных стекол – например, рабочий стол Ultrabase от компании Anycubic. Применение указанных средств ограничивается быстрым износом пленочных и силиконовых покрытий при интенсивной эксплуатации, а также отсутствием совместимости между отдельными стеклами и моделями принтеров от различных производителей. Иные методы предлагаются и пользователями принтеров, однако, носят кустарный характер и не могут быть использованы в условиях производства [5].

В качестве нового метода, повышающего надежность базирования изделия на рабочем столе 3D-принтера, нами предлагается комплексное покрытие, включающее компоненты: а) абразивные пластины с габаритными размерами 80x80x2 мм, зернистостью F240, выполненные из карбида кремния, б) дополнительный связующий слой между абразивной пластиной и основанием изделия. Связующий слой состоит из раствора ABS/PLA-пластика в ацетоне/дихлорэтане и наносится на контактную поверхность пластины методом распыления. Размеры нанесенного слоя зависят от площади основания будущей детали и

поддерживающих структур, а нанесение производится перед запуском каждого последующего процесса печати. Фиксация пластины на рабочем столе выполняется с использованием стальной рамки и прижимов.

Проведена печать опытных образцов с различными геометрией корпусов и габаритными размерами, находящимися в пределах значения площади контактной поверхности абразивной пластины. Процессы изготовления образцов производились на отечественном 3D-принтере MZ3D-256 с установленной абразивной пластиной и нанесенным связующим слоем. В качестве материалов печати использованы ABS-, PLA-пластики.

В ходе проведения печати были выявлены следующие достоинства разработанного покрытия:

- Увеличение степени фиксации изделия на рабочем столе принтера;
- Сокращение общего времени печати и расхода материалов в связи с замещением каймы или подложки связующим слоем;
- Устранение деформаций первичных слоев основания объекта в результате температурных напряжений;
- Осуществление печати изделия на принтерах с конструкцией стола, не предусматривающей установку нагревательного элемента.

Необходимо дополнить, что при использовании предлагаемого метода, введение каймы или подложки перед запуском процесса печати целесообразно в ряде случаев изготовления деталей с габаритными размерами корпусов, в 3 и более раз превышающими размеры основания.

Таким образом, разработанное нами адгезивное покрытие для рабочих столов 3D-принтеров предоставляет возможность повышения качества изготовления прототипов и готовых деталей при меньших расходах времени и материалов.

Литература

1. Зленко, М.А. Аддитивные технологии в машиностроении / М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш // пособие для инженеров. – М. ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» 2015. С. 25, 48.

2. Гибсон, Я., Розен Д., Стакер Б. Технологии аддитивного производства. Трехмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016. С. 231.

3. Статья Print Quality Troubleshooting Guide [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.simplify3d.com.

4. Выбор покрытия рабочего стола для печати на 3D-принтере [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://tp3d.ru.

5. Пути повышения адгезии нижнего слоя в FDM-печати [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://3dtoday.ru.

## Испытания на усталость отсеков вала верхнего несущего винта Ка-226

Жемаев А.А.

Научный руководитель — Кириллин А.В.

МАИ, Москва

anton-zhemaev@rambler.ru

В процессе проектирования и изготовления элементы системы и ЛА в целом, подвергаются целому ряду различных испытаний, начиная от простейших контрольных до наиболее сложных стендовых и летных испытаний. Характер испытаний весьма разнороден. Однако, несмотря на это, их объединяет единая цель, заключающаяся в обнаружении дефектов проектируемого изделия. Под дефектом здесь понимается любое несовершенство процессов проектирования и изготовления, которое может привести к снижению эффективности ЛА если останется не устраненным. Дефекты могут возникнуть в результате

ошибок, допущенных в расчетах, неудачно выбранной конструкции, плохой сборки, отклонений от чертежа при изготовлении детали.В ряде случаев характер проводимых испытаний и их последовательность на различных предприятиях различны, определяются принятой технологией изготовления и зависят от конкретного типа проектируемого ЛА и его систем.[1] Проводится анализ программы испытаний на усталость отсеков вала верхнего несущего винта Ка-226 на соответствие требованием СТП. Цель, согласно программе испытаний – определить сопротивление усталости объектов испытаний. Предъявление объектов испытаний на проведение наземной стендовой отработки сопровождается паспортом на объект испытаний. Передача в испытательное подразделение объектов испытаний (систем и стендовых изделий) было произведено после транспортировки объекта к месту проведения испытаний, монтажа и выполнения в согласованном объеме необходимых сдаточно-технических операций бригадой производства-изготовителя объекта. К объектам испытаний прилагается документация: выходные паспорта на агрегаты, паспорт на изделие, перечень карточек разрешения на допущенные отступления.Объекты испытаний прошли входной контроль и входной контроль, При выходном контроле выполняется проверка комплектности объектов (в том числе, сопроводительной документации), целостность заводских пломб и внешний осмотр. Входной контроль выполняется по общим техническим требованиям и осуществляется комиссией, назначаемой распоряжением Заместителя Генерального конструктора по наземной стендовой отранботке. Все работы по организации входного контроля (выпуск распоряжения, подготовка рабочих мест и т.д.) осуществляются начальником испытательного подразделения.Непосредственно перед началом работ проводится контроль правильности сборки испытательной схемы.В ходе испытаний личный состав испытательного подразделения действует согласно утвержденной программе проведения испытаний и в строгом соответствии с правилами эксплуатации оборудования и охраны труда при его обслуживании. После окончания испытаний в журнале испытаний производится запись о полном завершении испытаний в объеме соответствующей программы.Оборудование, стенд, аппаратура управления и измерения приводятся в режим хранения в соответствии с действующей эксплуатационной документацией.Объект испытаний упаковывается, опломбируется и отправляется на дальнейшие испытания. В ходе работы было установлено следующее.Программа испытаний, разработанная в ОАО «Камов» по определению усталости отсеков вала верхнего несущего винта Ка-226, является структурированной, упорядоченной, выполненной в соответствии с нормативными документами.Анализ показал, что рассмотренная программа идентична по своей структуре стандартам по наземной стендовой отработке изделий, принятым в ряде организаций аэрокосмической отрасли, например ФГУП ГКНПЦ имени Хруничева. Отмечено много пересечений с общими требованиями, организацией и порядком проведения стендовых испытаний.

Список использованных источников:

1. Александровская Л.Н., Кириллин А.В. Системный подход в обеспечении качества испытаний изделий авиакосмической техники. -М.: Изд-во МАИ, 2017. -160 с.: ил.

## Статические испытания биконической части головного обтекателя

Заряда К.Ю.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Владимиров А.В.
МАИ, Москва
dontgiveaduck@yandex.ru

В докладе приведен технологический процесс статических испытаний биконической части головного обтекателя. Головной обтекатель предназначен для защиты от набегающего аэродинамического потока и аэродинамического нагрева на участке выведения, а также для

защиты космического аппарата от внешних воздействий на технологическом комплексе и стартовом комплексе. Кроме того, головной обтекатель снабжен устройствами, обеспечивающими возможность термостатирования космической головной части как в процессе транспортирования на технологический комплекс, так и в процессе нахождения на стартовом комплексе [1].

При разработке головного обтекателя необходимо предусмотреть защиту полезного груза от пыли и влаги (дождя) в условиях наземной эксплуатации, а также стабильный тепловой режим под обтекателем, как в условиях наземной эксплуатации, так и в полете. Для решения этой задачи используется целый комплекс средств и систем: носовая часть и конические отсеки головного обтекателя с внешней стороны имеют теплозащитное покрытие, на внутренней поверхности головного обтекателя установлена теплоизоляция. Головной обтекатель изготовляется из нескольких обечаек, которые представляют собой трёхслойные конструкции с алюминиевым сотовым заполнителем и обшивками из углепластика, содержащие усиления и вырезы для люков.

Целью статических испытаний биконуса является экспериментальное подтверждение статической прочности и несущей способности конструкции носовой части ГО при действии максимального аэродинамического давления на носовую часть ГО.

В докладе приведен технологический процесс проведения испытаний, включающий три этапа.

1. Подготовительный, который включает в себя изготовление стендовой оснастки, транспортировка и разгрузка объекта и входной контроль.
2. Основной, на котором идет нагружение биконуса внешним давлением, фиксируются показания датчиков. Это происходит в два этапа, на каждом этапе устанавливается разное экспериментальное давление.
3. Заключительный, на котором проводится дефектация изделия внешним осмотром.

1. Основы конструирования ракет-носителей космических аппаратов [Текст]: Учебник для студентов втузов / Б.В. Грабин, О.И. Давыдов, В.И. Жихарев, А.А. Золотов, А.А. Иванов, В.К. Сердюк, – М: Издательство «Машиностроение», 1991г. – 285с.

## Повышение удельных характеристик газотурбинного двигателя за счет использования адаптивной системы подачи охлаждающего воздуха

Золотухин А.А.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Силуянова М.В.
МАИ, Москва
dragur2@gmail.com

В настоящие время задача по экономии ресурсов и рациональном их использовании стоит во многих отраслях современной жизни, экономики, промышленности и в частности в двигателестроении.

Одной из основных задач в современном двигателе строении является повышении удельных характеристик двигателя на различных режимах его работы. Двигатели последних поколений работают в условиях повышенной тепловой нагрузки на горячие части турбины. Жаропрочные материалы, используемые в турбине, уже давно работают при температурах выше своих максимальных значений и в этом им помогает система охлаждения.

Одним из важнейших параметров для двигателя является общих расход воздуха. Часть этого воздуха уходит на систему охлаждения и не участвует в его работе, что влияет на его КПД.

В рассматриваемом двигателе охлаждение турбины происходит на всех режимах ее работы. Подача воздуха осуществляется по двум направлениям это через наружный контур двигателя, проходя через стойки, направляется в систему охлаждения турбины низкого

давления (ТНД) и через вторичную зону камеры сгорания, воздух из которой проходит через воздушный теплообменник и направляется в клапанный аппарат, который регулирует подачу охлаждающего воздуха в турбину высокого давления (ТВД). Регулировка при этом имеет всего 2 положения это полностью открыт и полностью закрыт, последний используется на минимальных режимах работы двигателя, во всех остальных система использует полный расход. Исходя из этого можно сделать вывод, есть режимы при которых подача охлаждающего воздуха в полном объеме избыточна.

Для решения данной проблемы была разработана система позволяющая регулировать подачу воздуха в систему охлаждения турбины на различных режимах работы двигателя. Реализация такой системы позволит сократить потребляемый системой охлаждения воздух, при этом сохранив его в работе, что позволит повысить КПД двигателя и сократить расход топлива и повысит его удельные характеристики на различных режимах его работы. Так же из за особенностей конструкции, и подачи охлаждающего воздуха в систему охлаждения турбины в рассматриваемом двигателе, за счет сокращения подачи охлаждения, дополнительно подогреваем рабочее колесо турбины, что при работе выражается в сокращении радиального зазора, что в том числе снизит потери при его работе.

## Оптимизация защитной пелены на поверхности полок соплового аппарата турбины высокого давления

Золотухина Д.А.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Силуянова М.В.
МАИ, Москва
Darya_dikova@mail.ru

На сегодняшний день развитие информационных технологий имеет огромное влияние практически на все отрасли науки. С другой стороны, уровень мировой экономики диктует свои условия. Одним из таких важнейших критериев выступает экономия ресурсов не только материальных, но и интеллектуальных, информационных и временных. Поэтому совершенствование IT играет одну из основных ролей. В частности, двигателестроение на всех этапах создания нового изделия и модификаций прошлых завязаны на CALS-технологиях. Они позволяют не только сконструировать полную 3D-модель двигателя, но и просчитать его возможные дефекты и несоответствия техническому заданию.

Одним из конструктивных требований, предъявляемых к современной турбине высокого давления (ТВД) газотурбинного двигателя (ГТД), является обеспечение необходимого расхода воздуха для охлаждения соплового аппарата (СА) ТВД, при температуре газа в горле СА близкой к 2000 К. Современные жаропрочные материалы, а также теплозащитные покрытия, наносимые на малую и большую полки соплового блока (СБ), частично решают проблему прогара.

В данной работе для решения этой задачи акцент делается на совершенствовании конструкции подвода охлаждающего воздуха из вторичной зоны основной камеры сгорания и оптимизации защитной пелены на поверхности полок СА ТВД.

В процессе изучения соответствующей литературы о возможных вариантах конструктивных решений были усовершенствованы имеющиеся модели подвода охлаждающегося воздуха. Численное моделирование проводилось с использованием коммерческого программного комплекса CFX 14.5. С помощью пакета ICEM CFD 14.5 были построены несколько расчётных областей проточной части СБ ТВД.

Для всех расчётных областей использовались одинаковые граничные условия. Критических ошибок выявлено не было.

В виду того, что проточная часть соплового аппарата турбины высокого давления характеризуется большими перепадами давления, это влечёт за собой расслоение, в пределах

малого объёма межлопаточного пространства по скорости высокотемпературного газового потока.

По результатам предварительных расчётов, мы имеем расслоение по скорости основного газового потока, из-за этого происходит снос охлаждающей пелены в сторону лопаточного профиля с пониженным давлением, тем самым подвергая треть защищаемой поверхности полки соплового аппарата воздействию высокотемпературного газового потока. В результате на поверхностях полок образуются прогары или растрескивание материала соплового аппарата. В процессе исследований фактов образования дефектов на полках соплового аппарата была обнаружена зависимость между равномерностью распределения защитной пелены на поверхности полок соплового аппарата и распределением скорости потока в канале подвода охлаждающего воздуха проставки между основной камерой сгорания и сопловым аппаратом.

## Особенности технологии гидро-проливочных испытаний бака окислителя

Иванова А.П.
Научный руководитель — Кириллин А.В.
МАИ, Москва
alexandra.ivanovaa@yandex.ru

Испытания как основная форма контроля изделий представляют собой экспериментальное определение количественных и качественных показателей свойств изделия как результата воздействия на него при его функционировании, а также при моделировании объекта[1]. Цели испытаний различны на различных этапах проектирования и изготовления.

Поэтому при составлении общей программы испытаний необходимо учитывать специфику каждого вида испытания и планировать их так, чтобы обеспечить наибольшую эффективность всей программы в целом.

В ряде случаев характер проводимых испытаний и их последовательность на различных предприятиях различны, определяются принятой технологией изготовления и зависят от конкретного типа проектируемого ЛА и его систем.

По результатам испытаний изделий в производстве разработчик устанавливает причины снижения качества [2].

Одним из видов испытаний являются проливочные. На проливочном стенде проводятся автономные испытания агрегатов двигателя для решения задач, связанных с отработкой.

Необходимость в таких испытаниях возникла в результате неполной выработкой топлива (осталось около 100 л топлива). Выдвинута гипотеза о ошибке в работе заправочной системы из-за появления двухфазного потока или разрыва потока. Поэтому проводят исследования влияние негерметичности (из-за телескопического соединения) заправочно-сливочного трубопровода на работу бустерного насоса окислителя.

Основными конструктивными элементами топливных отсеков являются топливные баки различных конструкций, оснащенные большим числом внутрибаковых устройств, обеспечивающих нормальное функционирование ДУ.

Так как основными конструктивными элементами топливного отсека ЛА с ЖРД являются баки, предназначенные для размещения компонентов жидкого топлива (окислителя и горючего), то и технические требования обусловлены конструкцией баков.

Кислородно-водородный разгонный блок 12КРБ разработан и изготовлен в Государственном космическом научно-производственном центре им. М.В.Хруничева по соглашению с Индийской организацией космических исследований (ИСРО) для новой индийской ракеты-носителя GSLV. 12КРБ является третьей ступенью РН GSLV.

В качестве маршевого двигателя используется жидкостной двигатель на криогенных компонентах топлива (жидкий кислород и жидкий водород), разработанный Конструкторским бюро химического машиностроения им. А.М.Исаева. Топливные баки 12КРБ изготавливаются из высокопрочных алюминиевых сплавов. Для поддержания тепловых режимов криогенных компонентов топлива во время предстартовой подготовки и в процессе полета топливные баки и элементы конструкции 12КРБ покрыты снаружи комбинированной теплоизоляцией.

В результате проведения 15-ти экспериментов по сливу жидкости из бака "О" через магистраль питания бустера установлено.

1. В процессе заправки бака “О” через магистраль ОЗС происходит практически полное заполнение ВБУ жидкостью.

2. Объем жидкости в баке "О", ВБУ и магистрали питания бустера на момент характерного изменения перепада давления по параметру СКСУО (начало прорыва газа из бака в ЗУ) составляет 191 … 214 литров.

3. Слив жидкости из бака завершается разрывом потока в прозрачной вставке, при этом остаток жидкости не превышает:

в баке “О” - 14 л;

в ВБУ - 3,9 л.

Это соответствует конструктивным невырабатываемым остаткам.

4. Негерметичность до 0,7 л/с зазора в телескопическом соединении между ЗСК и заправочной магистралью, моделируемая путем вдува газа, не влияет на процесс выработки жидкости из бака и функционирование бустерного насоса, а также не приводит к сепарации газа и накоплению его в ВБУ.

По результатам испытаний можно сделать вывод о том, что нештатная работа двигателя третьей ступени 12КРБ не связана с появлением двухфазного потока или разрывом потока на выходе из работающего бустера "О", поэтому вносить конструктивные изменения в данную систему не нужно. Необходимо продолжить работу над поиском первоисточников нештатной ситуации и решений по их нейтрализации.

Список использованной литературы

1. Бахвалов Ю.О. «Испытания ракетно-космической техники. Введение в специальность: учеб. пособие / Ю.О. Бахвалов. М.: ООО «АИР», 2015. 228 с.

2. Александровская Л.Н., Кириллин А.В. «Системный подход в обеспечении качества испытаний изделий авиакосмической техники».- М.: Изд-во МАИ, 2017. – 160с.

## Исследование процесса гибки труб на оборудовании с ЧПУ

Ильченко П.А.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Чумадин А.С.
МАИ, Москва
zmz4021@gamil.com

В авиа- и ракетостроении одной из насущных проблем является оптимизация технологических процессов гибки труб. Это обусловлено широкой номенклатурой систем и агрегатов, включающих в свой состав сложные трубопроводы - двигательные установки, пневмогидросистемы, системы жизнеобеспечения, терморегулирования, и др.

Исторически сложилось так, что многие изделия выпускаются единично или мелкосерийно, поэтому технологические процессы состоят из малопроизводительных операций, выполняемых вручную. Это увеличивает продолжительность цикла изготовления изделия, а также практически исключает вероятность установки готового трубопровода без доработки "по месту".

По существующим технологическим процессам гибка труб осуществляется с наполнителем (переохлажденный лед) на ручных трубогибах по шаблону. Метод контроля по эталону субъективен и усложняет приемку трубопроводов техническим контролем и представителями Заказчика. Кроме того, отсутствие литературы по технологической подготовке производства трубопроводов усложняет задачу определения параметров заготовки, поэтому данные получают экспериментальным путем.

Применение оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ) позволяет автоматизировать процесс гибки труб. Работы в этом направлении велись еще в СССР. В частности, были разработаны станки серии ТГСП. Гибка труб осуществлялась с применением гидронаполнителя-эмульсии по принципу наматывания на гибочную оправку [1]. В настоящее время технология гибки с гидронагружением практически не применяется.

Современные станки способны осуществлять гибку в полностью автоматическом режиме, оператор лишь устанавливает заготовку и извлекает деталь. Применение шариковых дорнов снижает риск образования гофров и овальности. Наличие следящих устройств гарантирует точное соответствие трубы эталону. Гибочные головки со сменными роликами обеспечивают возможность гибки трубы по нескольким радиусам без прямолинейных участков. Работа инженера-технолога сводится к разработке технологических ограничений для проектирования трубопроводов. Основным ограничением является минимальный радиус изгиба [2].

Специализированное программное обеспечение позволяет работать с 3D-моделями, что расширяет возможности систем автоматизированного проектирования (САПР). Применение координатно-измерительных машин не только упрощает контроль геометрии готовых трубопроводов, но также ускоряет процесс модернизации существующих изделий за счет "оцифровки" базы эталонов предприятия. Операции контроля сводятся к сравнению получившейся трубы с технологической моделью, и при обнаружении несоответствий, поправки (в частности, на пружинение) вносятся в управляющую программу автоматически.

Таким образом, применение оборудования с ЧПУ снижает длительность производственного цикла, практически исключает влияние "человеческого фактора", упрощает контроль геометрии труб, позволяет внедрить САПР в производство, и снижает себестоимость изделия.

Литература.

1. Катков В.Ф. Оборудование и средства автоматизации и механизации заготовительно-штамповочных цехов [Учеб. пособие для авиац. спец. вузов]. М.: Машиностроение, 1985. 384 с., ил.

2. Листовая штамповка: Расчет технологических параметров: Справочник / под ред. В.И. Ершова и А.С. Чумадина. М.: Изд-во МАИ, 1999. 516 с., ил.

## Анализ технологической оснастки и виброиспытаний

Исаев И.М.
Научный руководитель — Кириллин А.В.
МАИ, Москва
ivan-isaev-1995@mail.ru

В процессе проектирования и изготовления элементы систем и ЛА в целом, подвергаются целому ряду различных испытаний [1], начиная от простейших контрольных до наиболее сложных и летных испытаний. Характер испытаний весьма разнороден. Однако, несмотря на это, их объединяет единая цель, заключающаяся в обнаружении дефектов проектируемого изделия. Под дефектом понимается любое несовершенство процессов проектирования и изготовления, которое может привести к снижению эффективности ЛА если останется не устраненным. Так же дефекты могут возникнуть в результате ошибок,

допущенных в расчётах, неудачно выбранных конструкциях и материалах, плохой сборки, отклонений от чертежа при изготовление детали.

Опыт испытаний показывает, что эффективность обнаружения дефекта зависит от типа испытаний и различна на разных этапах программы испытаний. Поэтому при составлении общей программы испытаний необходимо учитывать специфику каждого вида испытаний и планировать их так, чтобы обеспечить наибольшую эффективность всей программы в целом [2].

Проведение виброиспытаний машин, приборов и аппаратуры различного назначения подразумевает собой приложение к объекту испытаний заданного закона ускорения в соответствии с действующими отраслевыми нормативами. В большинстве случаев воздействие требуется прикладывать к объекту поочередно в трёх взаимно перпендикулярных направлениях для того, чтобы иметь возможность оценить работоспособность изделия в случае действия ускорения с произвольным направлением.

Для закрепления объекта с различной ориентацией в пространстве при проведении таких испытаний требуется технологическая оснастка для виброиспытаний, выступающая в роли переходного узла, передающая силовое воздействие между столом вибростенда и объектом испытаний в заданном диапазоне частот испытаний.

Однако при проведении данных испытаний, технологическая оснастка, может с резонировать, и выдать нам свои частотные показатели, что крайне при испытаниях не желательно. Поскольку показатель данной погрешности велик, стоит рассматривать данный вопрос и проблему устранения данных погрешностей более детально.

Литература

1. Испытания ракетно-космической техники. Введение в специальность: учеб. пособие / Бахвалов Ю.О. М.: ООО «АИР», 2015. 228 с.

2. Александровская Л.Н., Кириллин А.В. Системный подход в обеспечении качества испытаний изделий авиакосмической техники. - М.: Изд-во МАИ, 2017. - 160 с.: ил.

## Технико-экономическое обоснование применения новых технологий при создании малых космических аппаратов

Карпухина Г.В.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Кирякин А.А.
АО Корпорация ВНИИЭМ, Москва
galya20@bk.ru

В настоящее время повсеместно ставится цель повышения глобальной конкурентоспособности продукции предприятий ракетно-космической промышленности.

Добиться поставленной цели для отечественных космических аппаратов возможно за счет уменьшения сроков разработки и производства, а также снижения себестоимости космических аппаратов при одновременном улучшении их целевых показателей: пространственного разрешения, надежности, срока активного существования, точности позиционирования.

Как известно, корпуса большинства существующих отечественных МКА создаются преимущественно на основе металлических каркасных конструкций и сотовых алюминиевых панелей. Для таких аппаратов уже достигнуто оптимальное соотношение масса/прочность (жесткость) и их существенная модернизация невозможна. Вместе с тем, при сегодняшней высокой стоимости единицы веса полезной нагрузки, выведенной на орбиту, всегда остается актуальной проблема снижения веса основной конструкции до допустимого минимума [1, 2].

Для внедрения новых технологий в существующее на протяжении длительного времени производство необходимо провести технико-экономический анализ целесообразности их применения для создания МКА.

Используя последние достижения в области цифровых методов производства и аддитивных технологий на производстве становится возможным существенно улучшить существующие технико-экономические показатели космических аппаратов – сократить затраты времени и средств до 70% – за счет:

1) проектирования оптимальной конструкции космического аппарата новыми, модельно-ориентированными методами с ориентацией на аддитивные технологии производства и новые материалы;

2) кардинального снижения количества технологических переделов, снижения длительности технологического цикла, а также снижения количества единиц задействованного оборудования и персонала за счет применения аддитивных технологий;

3) сокращения необходимой конструкторской и технологической документации, ориентированной на существующее производство, использующее устаревшие технологии;

4) отказа от разработки и согласования «бумажной» КД и ТД;

5) существенного сокращения номенклатуры приобретаемых и хранящихся материалов и полуфабрикатов.

В работе представлены результаты технико-экономического обоснования применения новых технологий при разработке МКА. Выполнен анализ основных параметров существенного влияния на затраты при конструировании и проектировании МКА. Разработанные решения по снижению затрат на этапе выпуска МКА на основе применения аддитивных и цифровых технологий.

## Методика моделирования теплового состояния рабочих лопаток турбин ГТД с тепло барьерными покрытиями при испытаниях

Картавцев А.С.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Лепешкин А.Р.
395 военное представительство Министерства обороны, Москва
kartavcevartem@ya.ru

Для обеспечения долговечности перспективных авиационных ГТД требуется создание новых высокотемпературных и керамических материалов, а также улучшение теплозащиты деталей турбин с помощью теплобарьерных керамических покрытий (ТБП).

Поэтому при создании ТБП требуется проводить исследования его термопрочности и ресурса вместе с промежуточным металлическим жаростойким покрытием и защищаемым материалом лопатки турбины в условиях высокой скорости нагрева и охлаждения при испытаниях.

В данной работе разработана расчетно-экспериментальная методика теплового состояния рабочих лопаток турбин ГТД с теплобарьерными покрытиями столбчатой структуры в условиях высокочастотного электронагрева при термоциклических испытаниях лопаток и их моделей с керамическим ТБП на основе диоксида циркония.

В усовершенствованной расчетно-экспериментальной методике рассматриваются и используются сложные взаимосвязанные физические процессы: нагрев металла и керамики в высокочастотном электромагнитном поле, диэлектрический нагрев керамики, нестационарные поля температур и термонапряжений в металлокерамической детали с охлаждающими отверстиями с учетом электро и теплофизических свойств материалов при термоциклических испытаниях. При этом учитывалось влияние тонкого керамического слоя, частично нанесенного на поверхности внутри охлаждаемых отверстий, на локальное тепловое состояние лопаток.

Анализ термоциклических испытаний с моделированием эксплуатационного теплового состояния рабочих охлаждаемых лопаток на специальной установке с высокочастотным генератором показал, что лопатки турбины ГТД с керамическими ТБП имеют долговечность в среднем в 2-3 раза больше, чем лопатки без ТБП.

## Получение многослойных композиционных покрытий электроискровым легированием

Кианианфар М.М.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Бойцов А.Г.
МАИ, Москва
mjkianian@yahoo.com

Одним из направлений повышения качественных характеристик покрытий является их многослойное нанесение. Целесообразность применения многослойных покрытий вытекает из возможности получения комплекса свойств поверхности. Например, обеспечение сопротивления изнашиванию и антифрикционных свойств. В этом случае нижний слой обеспечивает сопротивление изнашиванию и наносится из соответствующего твердого материала, а наружный слой выполняется из антифрикционного материала. Для повышения жаростойкости в качестве нижнего слоя может быть нанесен материал, имеющий малый коэффициент самодиффузии, например, тантал, препятствующий рассасыванию верхнего жаростойкого слоя (MeCr-Al-Y, Al, MoSi2 и др.).

Принцип многослойности может быть применен для повышения прочностных свойств покрытий, снижения пористости, релаксации внутренних напряжений. Слоистостью покрытия увеличивают его вязкость и сопротивление растрескиванию. Известно, что тонкие покрытия имеют, как правило, более высокие характеристики плотности и прочности. Нанесение толстых покрытий часто сопровождается формированием внутренних напряжений, крупнозернистой структуры, увеличенной пористости. Нанесение слоев твердых, а следовательно хрупких материалов с вязкими прослойками обеспечивает комплекс полезных свойств (жаростойкость и сопротивление изнашиванию при высоких температурах, усталостная прочность и эрозионная стойкость и т.д.). Принцип многослойности позволяет получать мелкозернистые покрытия, локализовать и залечивать микротрещины, формировать остаточные напряжения сжатия, управлять градиентами твердости и остаточных напряжений по толщине покрытия, снизить тепловые деформации на границе покрытия с подложкой.

В докладе рассмотрены вопросы получения многослойных композиционных покрытий методом электроискрового легирования (ЭИЛ). Электроискровое легирование (ЭИЛ) является одним из эффективных методов поверхностного легирования, которое достигается плавлением и перемешиванием материалов легирующего электрода (ЛЭ) и упрочняемого изделия при электрических импульсных разрядах. Оно имеет широкие возможности по управлению составом и свойствами легированного слоя, обеспечивает универсальность и широту технологических применений. Позволяет существенно повысить износостойкость, фреттингостойкость, теплостойкость и антифрикционные свойства, обеспечить экономию дорогостоящих материалов.

В результате выполненных исследований установлено, что получение ЭИЛ многослойных покрытий возможно в том случае, если материалы ЛЭ, используемые для нанесения отдельных слоев, значительно отличаются по сопротивлению электрической эрозии. Например, первый слой наносится ЛЭ из твердого сплава (ВК6-М, Т15К6), а затем производится ЭИЛ более легкоплавким ЛЭ (бронзы, латуни, алюминий, олово и др.).

Приведены результаты, полученные при нанесении многослойных композиционных покрытий предназначенных для обеспечения износостойкости и антифрикционных свойств,

а также для обеспечения жаростойкости. В последнем случае на образцы последовательно наносились слои Ta, Cr, Ti и Al., а также Ta, TiB2, A1 Проведенные испытания на изнашивание и жаростойкость показали эффективность нанесенных покрытий.

## Лабораторная установка для исследования технологических характеристик процессов электрохимической обработки

Колганов Д.А.
Научный руководитель — профессор, к.т.н. Моргунов Ю.А.
Московский политехнический университет, Москва
dmitry.kolganov@yandex.ru

При исследовании анодного растворения и катодного осаждения металлов и сплавов необходима экспресс информация о свойствах обработанной или вновь полученной поверхности и приповерхностного слоя. С целью технического обеспечения получения такой информации разработана универсальная установка для проведения экспериментальных работ, включающая в себя стенд, контейнер для установки и обработки образцов и специальный источник питания.

Установка позволяет обрабатывать цилиндрические образцы диаметром 10 мм и площадью рабочего торца 80 мм2 и длинномерные образцы с площадью рабочей поверхности 2x80 = 160 мм2. Регулируемыми параметрами, определяющими режим обработки, являются вид тока (импульсный, постоянный), амплитудные и временные характеристики тока, величина межэлектродного зазора, входное и выходное давление, состав и свойства применяемой рабочей жидкости.

После предварительной обработки рабочих поверхностей образца (шлифование, полирование, обезжиривание, мойка, сушка) он устанавливается в рабочий блок из оргстекла, фиксируется и закрепляется в нем. Блок базируется и закрепляется в контейнере, конструкция которого обеспечивает точную взаимную ориентацию электрода и противоэлектрода с заданным рабочим зазором между ними. Включается подача рабочей жидкости, устанавливается требуемая величина давления и включается источник питания с предварительно выбранными параметрами режима работы. Время обработки устанавливается по таймеру с точностью ±0,1 с.

Возможности источника питания позволяют моделировать следующие технологические процессы:

− электрохимическая размерная обработка,
− электрохимическое осаждение покрытий,
− электрохимическое полирование,
− микродуговое оксидирование,
− электроразрядные процессы в жидкой или газовой среде, в том числе электроэрозионную обработку и электроискровое легирование,
− комбинированные процессы обработки.

После обработки образца, его промывки и сушки можно осуществить исследование и оценку основных технологических характеристик: производительности, точности обработки, параметров шероховатости поверхности. Отделение обработанной части образца на проволочно-вырезном электроэрозионном станке позволяет анализировать шлифы и получать информацию о строении и свойствах поверхностного слоя (толщина, распределение микротвердости), проводить исследования морфологии поверхности на оптическом и электронном микроскопах, микро рентгеноструктурный анализ поверхностного слоя. Цилиндрические образцы можно использовать для исследования износостойкости на машинах трения по схеме «стержень − диск».

Апробация лабораторной установки и отдельных методик исследования на ее основе показали эффективность ее использования при технологической подготовке производства изделий из новых материалов.

## Исследование возможности применения лазерной сварки в промышленности

Колесников Д.Н., Мухамадеев И.М., Вулпе М.Н.
Научный руководитель — доцент, к.э.н. Курынцев С.В.
КНИТУ-КАИ, Казань
Dmitry_kolesnikov1995@mail.ru

Лазерный луч как источник энергии для соединения материалов находит всё большее применение в промышленности благодаря ряду особенностей позволяющих производить уникальные операции сварки, которые недоступны другим способам, совмещая преимущество электронно-лучевой сварки с возможностью проводить операцию вне вакуумной камеры. Благодаря возможности автоматизации процесса и высокой производительности лазерная сварка успешно применяется в крупносерийном и массовом производстве, например, автомобильной промышленности. В последнее время появляются установки мощностью до 30 кВт и выше, что позволяет сваривать детали большой толщины в один проход. Возможность изменять фокусировку луча позволяет производить сварку в труднодоступных местах, а высокая плотность энергии на малой площади позволяет производить сварку без предварительного скоса кромок что снижает затраты на присадочный материал, но повышает требования к точности сборки и зазору между свариваемыми деталями. В настоящее время рассматривается возможность сварки лазерным лучом магистральных трубопроводов большого диаметра, что позволит увеличить производительность, и ускорить строительство трубопроводов за счёт применения лазерной сварки труб в пары с последующей транспортировкой к трубопроводу. В работе [2] проведено исследование сварочной ванны в различных пространственных положениях, с целью установить возможность ЛАЗЕРНОЙ сварки в потолочном положении, с образованием корня шва, удовлетворяющего всем требованиям. Наиболее сложным положением было установлено потолочное, так как в этом случае расплавившийся металл шва под действием собственного веса образовывал в корне шва вогнутость, ослабляющую сварное соединения. Исследование проводилось на пластинах из стали Ст3 и 09Г2С и сегмент трубы диаметром 710 мм из стали класса К60. Авторами установлено, что необходимые параметры шва удалось получить только при обеспечении зазора до 0,2 мм, увеличение зазора до 0,3 приводило к провисанию корня за счёт увеличения ширины сварочной ванны. В работе [3] рассмотрено применение лазерной сварки в области теплообменного оборудования возможности лазерной сварки позволяющие получать соединения с минимальным короблением позволили создать теплообменные панели, входящие в состав рекуператоров были сварены из высоколегированной стали 12Х18Н10Т, позволили снизить потребление кокса. Для повышения качества сварного соединения была разработана специальная оснастка, обеспечивающая минимальный зазор между деталями. Применение лазера позволило избежать деформаций и получить изделие, удовлетворяющее всем требованиям.

Список литературы.

1. Курынцев С.В., Шиганов И.Н. Современные тенденции лазерной сварки Обзор часть 1 // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2015. № 6. С. 35 – 42.

2. Шамов Е. М., Бегунов И. А., Иванисов Д. В., Орешкин А. А., Васильев А. А., Вечернин А. В., Шелестова А. К. — Влияние основных параметров лазерной сварки на формирование сварного шва в потолочном положении // Сварочное Производство. 2018 № 1. С. 14 – 20.

3. Сухов А. Г., Малыш М. М., Шанчуров С. М. — Применение лазерных технологий при изготовлении теплообменного оборудования // Сварочное Производство. 2018 № 1. С. 34–38.

## Смесь распределений как альтернатива байесовскому подходу

Кольцова А.В.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Александровская Л.Н.
МАИ, Москва
6-alisa@mail.ru

Ключевым моментом системного подхода к организации экспериментальной отработки изделий авиационной и космической техники является возможность объединения информации о статистических показателях качества этих изделий с целью обеспечения их точной и достоверной оценки на заключительных этапах отработки. Большое количество разнообразных испытаний, приводящихся при этом, обусловили статистическую разнородность получаемых результатов. Классические методы объединения информации, базирующиеся на байесовским подходе, позволяют корректировать априорную информацию на основе вновь поступающих данных, однако накладывают на вид этой априорной информации достаточно жесткие ограничения в виде задания априорного закона распределения вероятностей исследуемого показателя, согласованного с законом распределения поступающих данных и условия статистической однородности объединяемой информации. Кроме того, процедура байесовского оценивания достаточно сложна в математическом плане и требует от пользователя специальной подготовки. От перечисленных недостатков свободна так называемая смесь распределений, представляющая собой аддитивную композицию нескольких законов распределения с некоторыми весомыми коэффициентами, зависящими как от объемов выборок объединяемых данных, так и от каких – либо других характеристик, в том числе в рассматриваемом случае – от степени статистической однородности этих данных. Степень статистической однородности предлагается оценивать на основе использования известных критериев проверки однородности в виде наблюдаемого уровня значимости, определяющего размер области принятия гипотезы однородности. Предлагаемый подход проиллюстрирован на примере объединения измерений вертикальной скорости приземления самолета при его автоматической посадке, полученной при проведении трех этапов летных испытаний, различающихся целями и условиями проведения. Приведенный пример представляет собой по существу рабочую методику, которая может найти широкое применение в разнообразных практических приложениях, основанных на постепенном наращивании объема измерительной информации.

## Разработка стенда для вибропрочностных испытаний

Кондаков И.Н.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Павлов В.В.
МАИ, Москва
kond.ilya@yandex.ru

Вибропрочностные испытания конструкции космического аппарата, обеспечивающие проверку её целостности (прочности) и надежности (герметичности и пр.), определение динамических характеристик и отклика в условиях вибрационного воздействия существенно сокращают время отработки изделий ракетно-космической техники, вскрывая их технологические несовершенства [1,2].

Существующий стенд резиново-кордовых оболочек предназначен для крепления, размещения объекта испытаниий и передачи на него вибронагружений от вибраторов.

Он состоит из:

- несущей опоры (рамы);
- резиново-кордовых оболочек (6 штук);

- системы подачи сжатого воздуха;
- платформы;
- переходников под вибраторы;
- пластинчатых пружин (4 штуки);

После монтажа объекта испытаний на стенд и подведения к нему вибраторов до начала вибронагружения осуществляется наддув резиново-кордовых оболочек. Наддув осуществляется воздухом через подведенные к резиново-кордовым оболочкам трубки, на которых установлены монометры. Воздух поступает из четырех заводских магистралей.

В результате наддува происходит обезвешивание платформы с объектом испытаний. Далее осуществляется процесс вибронагружения вибраторами с заданными параметрами, плавность поперечных колебаний обеспечивается амортизирующими пластинчатыми пружинами.

После завершения нагружения осуществляется сброс давления из резиново-кордовых оболочек.

В результате анализа работы существующего стенда, для оптимизации процессов испытаний необходимо провести усовершенствование стенда. Для этого необходимо:

- уменьшить массу платформы за счет замены ее на более легкую при сохранении габаритов.
- замена резиново-кордовых оболочек на четыре платформы на роликовых подшипниках.

Поперечный ход осуществляется за счет передвижения силовых рельсов по роликовым подшипникам.

Уменьшение массы платформы возможно за счет применения в качестве материала алюминия. Алюминий широко применяется как конструкционный материал. Основные достоинства алюминия в этом качестве — лёгкость, податливость штамповке, коррозионная стойкость, неядовитость его соединений.

При вибронагружении на проектируемом стенде со скользящими опорами передача усилия от вибратора к объекту испытаний осуществляется через кольцо, которое в свою очередь осуществляет свой поперечный ход за счет скользящих опор, принцип скольжения которых заключается в передвижении силовых рельсов по роликовым подшипникам.

Вследствие усовершенствования стенда:

- появляется возможность испытывать на стенде более тяжелые объекты испытаний, за счет уменьшения паразитной массы платформы.
- из-за упразднения системы наддува резиново-кордовых оболочек, уменьшается время испытания.
- упрощается конструкция стенда, а, следовательно, его обслуживание и эксплуатация.
- повышается безопасность при эксплуатации стенда.
- увеличивается качество работы стенда за счет увеличения точности по ходу и плоскостных перемещений.
- увеличивается надежность.

Благодаря разработанному проекту стенда повышается надежность, уменьшается трудоемкость испытаний и повышается их безопасность.

Литература

1. Испытания ракетно-космической техники. Введение в специальность: учеб. пособие / Бахвалов Ю.О. М.: ООО "АИР", 2015. 228 с.

2. Теоретические основы испытаний и экспериментальная отработка сложных технических систем / Л.Н. Александровская, В.И. Круглов, А.Г. Кузнецов и др.: Учеб. пособие. М.: Логос, 2003. - 736 с.

# Электроискровое легирование титановых сплавов графитовыми электродами

Корешков А.В.
Научный руководитель — доцент, д.т.н. Бойцов А.Г.
МАИ, Москва
koresh199304@gmail.com

В настоящей работе рассмотрены особенности формирования упрочненного слоя при использовании графита в качестве легирующего электрода при электроискровом легирования поверхностей деталей из титановых сплавов.

Выбор графита в качестве электродного материала обусловлен следующими факторами:

- при взаимодействии с титаном образует карбидные фазы, обладающие высокой износостойкостью;
- включения графита повышают антифрикционные свойства, поскольку графит в свободном состоянии является твердосмазочным материалом;
- не требуется инертная или восстановительная среда, легирование может происходить на открытом воздухе;
- размеры деталей практически не изменяются, что является важным преимуществом.

Электроискровое легирование выполнялись на установке ELFA-731. В качестве анода использовался пористый графит. Упрочнению подвергались образцы из титанового сплава ВТ20. Обработка проводилась с варьированием технологических режимов

(энергии единичного импульса W, тока короткого замыкания Iк, скважности q и длительности импульса τ).

Фазовый состав полученных соединений исследовали на рентгеновском дифрактометре Bruker Advanced 8. Рабочий режим – 40 кВ, 40 мА, Cu излучение, никелевый фильтр, диапазон измерений 2θ 5 – 80°, шаг по углу сканирования 0.01°. Установлено, что во всем диапазоне используемых параметров разряда и удельного времени обработки в легированном слое присутствуют четыре основных фазы фазы – Ti, TiC, Ti8C5 и Ti6C3.75.

Спектры комбинационного рассеяния света (КР) в интервале 4000 - 50 см-1 были получены на спектрометре Renishaw U1000 (Ar+ - лазер, λ = 514,5 нм). Раман-спектры измеряли на спектрометре, оборудованном монохроматором SPEX. В качестве возбуждающей использовали зеленую линию аргонового лазера с длиной волны 514,5 нм. Для всех образцов наблюдались одинаковые результаты. Образец неоднороден. Присутствовали (локально) участки с высокой степенью кластеризации графитовых слоев, то есть sp2 углерод (G-линия) преобладал (ID/IG = 0,71), либо с sp3 углеродом (D-линия), то есть в образце наблюдалось увеличение разупорядочения C-C связи, а также присоединение атомов водорода и кислорода к атомам углерода, имеющих свободные валентности ID/IG = 1,57

Показано, что благодаря интенсивным процессам диспергирования и сублимации анода – графита на начальной стадии процесса электроискрового легирования на поверхности титанового сплава формируется слой мелкодисперсного графита. В дальнейшем разряды протекают в этом слое и через него. Высокая концентрация углерода в зоне плавления титановой подложки обеспечивает, в первую очередь, синтез карбидных фаз и диффузию углерода в титановую подложку. При этом подавляются формирование оксидных фаз титана имеющего, как известно, высокое сродство к кислороду. В результате воздействия импульсных электрических разрядов малой энергии, протекающих между графитовым электродом и поверхностью, на последней образуется слой, представляющий собой перемешанный быстрозакаленный материал, содержащий карбиды титана и графитовые включения.

# Оценка методов химико-термической обработки применительно к изготовлению высоконагруженных деталей ГТД

Косенко П.К.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Курицына В.В
МАИ, Москва
Kosenko200397@yandex.ru

Совершенствование технологий производства двигателей летательных аппаратов важнейшая из задач современного авиастроения в России и мире. С разработкой ГТД новейших поколений возникают проблемы обеспечения работоспособности в условиях роста тепловых, силовых и других нагрузок ответственных узлов и деталей двигателя. Увеличение ресурса, надёжности, ремонтопригодности при сохранении или повышении тактико-технических и эксплуатационных характеристик двигателя является важным направлением развития современных производственных технологий.

Одним из эффективных методов технологического обеспечения ресурса высоконагруженных деталей является химико-термическая обработка (ХТО), заключающийся в диффузионном насыщении поверхностного слоя активными атомами легирующих элементов из внешней среды: жидкой (расплавы солей), твёрдой (порошковые среды и обмазки), газообразной (газовые среды, содержащие необходимые легирующие элементы) – при повышенных и высоких температурах [1]. В процессе ХТО выделяют три стадии: 1) образование активных атомов в насыщающей среде вблизи или на поверхности; 2) адсорбция (сорбция) активных атомов поверхностью насыщения; 3) диффузия – перемещение адсорбированных атомов в решетке обрабатываемого металла, что возможно при наличии растворимости диффундирующего элемента в обрабатываемом материале и достаточно высокой температуре, обеспечивающей энергию необходимую для протекания процесса. В зависимости от ведущих легирующих элементов в авиационном производстве применимы такие виды ХТО, как цементация (насыщение углеродом), нитроцементация (насыщение азотом и углеродом), азотирование (насыщение азотом), борирование (насыщение бором), силицирование (насыщение кремнием), алитирование (насыщение алюминием), титанирование (насыщение титаном).

Для обоснования выбора метода ХТО из спектра технологических альтернатив применительно к конкретным эксплуатационным условиям работы детали «вал КНД» в работе применен метод экспертной оценки [2] с привлечением в качестве экспертов специалистов в области металлообработки АО «НПЦ газотурбостроения "САЛЮТ"». В условиях организации, проведения и обработки данных многовариантной, многокритериальной коллективной экспертизы были разработаны: система учета оценок значимости и квалификации экспертов; система критериев с оценкой их важности для целей экспертизы; система оценок степени удовлетворения конкретным технологическим методом производственно-технологических, эксплуатационных, экономических, экологических и других требований. Среди критериев оценки наиболее важными экспертами отмечены твёрдость, однородность, глубина насыщаемой поверхности; производительность, стоимость, энергоёмкость, экологичность процесса, требуемая квалификация персонала. Приняты во внимание технологические ограничения и оснащенность предприятия. В результате обработки экспертного мнения технология азотирования получила наиболее высокую интегральную оценку, статистически значимо превысив оценки методов цементации и нитроцементации. Статистическая обработка данных [3] определила высокое качество проведенной экспертизы по параметрам точности, достоверности, согласованности, что позволяет использовать данный метод в качестве экспресс-оценок технологических решений в производственных условиях.

# Поиск новых термоупругих физико-технических эффектов обеспечения точности станков

Крапивкин Р.В.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Юрин В.Н.
МАИ, Москва
roman_9494@mail.ru

Одно из условий решения актуальной проблемы эффективного управления качеством станков является широкий выбор альтернативных вариантов технических решений, что требует развития автоматизированных методов их генерирования с использованием информационных технологий и формализованного представления термоупругих физико-технических эффектов (ФТЭ) [1].

Каждый термоупругий ФТЭ [1] – это проявление известного термоупругого физического эффекта в конкретных условиях $\acute{\alpha}$ и β, накладываемых соответственно на входное воздействие A (тепловой поток Q, температуру t, тепловую деформацию δ) и на объект проектирования B так, что выходная характеристика объекта δ (его ТД) в направлении γ изменяется заданным (вполне определенным) образом. Такие ФТЭ определяют поведение деталей станка, определяющих точность обработки (шпиндельный узел, корпусные детали и др. В работе [1] предложена классификация термоупругих ФТЭ, описан созданный автоматизированный справочник – фонд таких ФТЭ, содержащий 35 ФТЭ, реализованных в станках путем выполнения конструкторских, технологических и организационно-технических мероприятий.

Для поиска новых термоупругих ФТЭ автором были просмотрены выпуски Реферативного журнала ВИНИТИ РАН «Резание материалов. Станки и инструменты» за 5 лет (2013-2017 гг. включительно). Было выявлено 30 публикаций в области исследования тепловых деформаций и совершенствования конструкции металлорежущих станков авторов из России, Китая, Тайваня. 32 % из них связаны только с исследованиями тепловых деформаций станков, остальные 68 % содержат предложения по снижению величины или степени влияния таких деформаций на точность обработки, в основе которых лежат те или иные термоупругие ФТЭ. При этом большинство этих предложений – 50 % относятся к компенсации тепловых деформаций дополнительными перемещениями рабочих органов. Тогда как всего 10 % работ направлены на уменьшение тепловых деформаций, путем повышения сопротивляемости технологической системы тепловым воздействиям изменением формы, материала, взаимосвязей элементов конструкции и др. Выявлен 1 новый термоупругий ФТЭ [2] повышения сопротивляемости технологической системы путем предискажения положения в пространстве формообразующих узлов станка в процессе сборки.

При поиске новых термоупругих ФТЭ, определяющих поведение стойки станка, по методике работы [3] было проведено тенденционное моделирование таких эффектов с проведением вычислительных экспериментов с их моделями.

При моделировании были проанализированы разные формы элементов, которые могут быть использованы для конструкций стоек станков: плоская пластина, спираль и разрезанный цилиндр. Выбор этих форм был обусловлен стремлением уменьшить характерный термический изгиб стоек при их тепловом нагружении, что отрицательно влияет на точность обработки на станках. Для каждой указанной формы варьировались их геометрические параметры, так что методом конечных элементов в среде SolidWorks 2016 были проведены 22 разных варианта расчета температурных полей и тепловых деформаций моделей. В результате проведенных исследований было выявлено, что наиболее эффективной формой, обеспечивающей уменьшение тепловых деформаций теплонагруженных стоек станка является разрезанный цилиндр с наибольшей толщиной

стенки, позволившей сократить тепловые деформации модели на 87 %, относительно наиболее простой геометрической формы - плоской пластины.

Проведение тенденционного моделирования с использованием моделей термоупругих ФТЭ позволяет в короткие сроки осуществлять верификацию новых предложений по повышению качества станков.

Литература

1. Юрин В.Н. Автоматизация ранних стадий проектирования средств повыше-ния качества станков путем управления их тепловыми деформациями. – М.: ВНИИТЭМР, 1991. – 72 с.

2. Гречушникова К.О. Повышение точности станка путем изменения его геометрической точности. / Всероссийская научно-техническая конференция «Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии»: материалы конференции, 4-7 апреля, 2017 г., Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – М.: ООО «КванторФорм», 2017. № гос. регистрации 0321701287. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://studvesna.ru/db_files/articles/2054/thesis.pdf. Дата обращения 9.11.2017.

3. Юрин В.Н. Тенденционное моделирование – технология автоматизирован-ного поиска инновационных конструкций. / Информатика и технологии. Вып. 2 (XXII). / Под ред. д.т.н., проф. Кондратенко В.С. – М.: МТИ, 2016. – С. 284-287.

## Исследование поглощения ИК-излучения тонкими интерференционными плёнками на основе низкотемпературных плазмохимических слоёв

Крупин В.В.

Научный руководитель — доцент, к.т.н. Жукова С.А.

МАИ, Москва

kpynuh@yandex.ru

В настоящее время тонкие интерференционные плёнки получили широкое распространение в оптико-электронных системах визуализации, являясь одной из основных составляющих неохлаждаемых матричных болометрических приёмников. Принцип работы микроболометрических приёмников основывается на терморезистивном эффекте, когда за счёт увеличения температуры уменьшается сопротивление массива единичных элементов (пикселей) детектирующего слоя, что регистрируется системой считывания и преобразовывается в изображение. В конструкции микроболометрического датчика тонкие интерференционные плёнки представляют собой мембрану, чувствительную к электромагнитному излучению и подвешенную над подложкой. Основной задачей мембраны является регистрация и поглощение электромагнитного излучения для последующей обработки и преобразования полученного сигнала в изображение. Мембрана содержит температурно-чувствительный слой и имеет два электрода, связывающих температурно-чувствительный материал и схему обработки сигнала.

Для обеспечения точности регистрации необходима максимальная реализация поглощения электромагнитного излучения в области ИК-спектра с длиной волны 8–14 мкм.

Целью работы является исследование поглощения ИК-излучения в тонких интерференционных плёнках, сопоставление расчётных данных с экспериментальными и выявление зависимостей поглощения ИК-излучения от состава и толщины плёнок.

За основу исследования взята конструкция микроболометрического детектора (патент № 2574524 RU «Быстродействующий широкодиапазонный инфракрасный микроболометрический детектор»). Объектами исследования являются полученные низкотемпературным плазмохимическим синтезом тонкие плёнки нитрида кремния (до 210 нм) – в качестве структурных диэлектрических слоёв и тонкие плёнки тантала (3–20 нм) – в качестве поглощающего слоя.Другие составные части мембраны: детектирующий слой

оксида ванадия, зазор и отражатель имеют фиксированную толщину (165, 1980 и 100 нм соответственно).

Толщины плёнок определяют абсолютную величину коэффициента поглощения, а величина зазора – положение максимумов пиков поглощения. Таким образом, изменение толщины составляющих слоёв мембраны микроболометрического детектора и величины зазора между мембраной и отражателем позволяет получить требуемые характеристики поглощения микроболометрического детектора.

Были последовательно рассчитаны зависимости поглощения ИК-излучения от длины волны в области 8–14 мкм в слоях нитрида кремния и тантала, выбраны толщины, обеспечивающие максимальное поглощение при соблюдении однородности коэффициента поглощения, после чего был произведён расчёт поглощения мембраны в целом на основе выбранных показателей толщин материалов. В дальнейшем планируется изготовить образцы тонких интерференционных плёнок с рассчитанными толщинами, после чего получить экспериментальные зависимости поглощения ИК-излучения и сопоставить с расчётными данными.

Список литературы:

1. Дёмин С.А., Жукова С.А., Турков В.Е., Трошин Б.В.Двухдиапазонный микроболометрический детектор // Прикладная физика, №4, 2016 г., сс.67–72

2. Жукова С.А., Турков В.Е., Дёмин С.А., Четверов Ю.С., Солодков А.А.Чувствительные элементы инфракрасных систем технического зрения на основе микроболометрических матриц формата 640x480 пикселей // Нано- и микросистемная техника, т. 19, № 2, 2017 г., сс.105–114

## Современное состояние и области применения магнитно-абразивной обработки в России и мире

Курилович С.В.
Научный руководитель — доцент, д.т.н. Бойцов А.Г.
МАИ, Москва
gdr1111@yandex.ru

Согласно ГОСТ 23505-79 магнитно-абразивная обработка (МАО) (англ. magnetic-abrasive machining, нем. Magnetschleifbearbeitung) — абразивная обработка, осуществляемая при движении заготовки и абразивных зерен относительно друг друга в магнитном поле.

МАО относят к методам обработки, основанным на комбинированном воздействии на заготовку электрофизических, электрохимических и механических факторов. Ее сущность заключается в удалении припуска материала абразивным способом. В зависимости от схемы МАО роль магнитного поля заключается: в формировании из магнитно-абразивного порошка абразивного инструмента (АИ) и в удержании его в зоне резания; в создании силы резания; в придании АИ или заготовке рабочих движений. Магнитное поле создает электрические токи в поверхностном слое движущейся заготовки, а её поверхность приобретает электрическую заряженность. Это активизирует электрохимические процессы на обрабатываемой поверхности, а действие поверхностно активных веществ, содержащихся в СОЖ, вызывает изменения структуры обрабатываемой поверхности и его механических свойств.

Различают три основных вида МАО: МАО с постоянным магнитом, МАО с постоянным током и МАО с переменным током.

Наибольших успехов в МАО с постоянным магнитом получил Лин С.Т. и др. При обработке образцов из нержавеющей стали марки SUS304, на обрабатывающем центре с ЧПУ. Оптимальными условиями обработки были признаны: рабочий зазор 2,5мм, скорость шпинделя 1 000об/мин, подача 10мм/мин и масса магнитно-абразивного порошка 2г.

Данный метод позволяет получать шероховатость Rmax=0,102мкм (зеркальная поверхность) при исходной Rmax=2,67мкм

Джайн В.К. и его коллеги проводили исследования в области МАО с постоянным током на предмет влияния рабочего зазора и окружной скорости на рабочие процессы. Предложенная ими установка для МАО предназначена для отделки цилиндрических заготовок и монтируется на универсальном токарном станке. Магнитный абразив готовят путем гомогенного смешивания магнитного порошка (порошок железа с размером зерна 51,4мкм), абразивного порошка (Al2O3 размером 25,7мкм) и связующего, (масло servospin-12). Исходя из полученных результатов, делается вывод о том, что рабочий зазор и окружная скорость заготовки являются параметрами, которые определяют производительность обработки, изменение величины шероховатости поверхности (ΔRa) и процентное ее улучшение. Удаление материала уменьшается при увеличении рабочего зазора и снижении окружной скорости заготовки. Изменение шероховатости поверхности увеличивается (в лучшую сторону) за счёт увеличения окружной скорости заготовки.

Наиболее оригинальной представляется МАО с переменным током предложенная Шинмурой Т. и Ямагучи Г. Предложенный ими новый процесс обработки, шестью катушками питаемыми трехфазным переменным током и установленными на круговой вилке, создаёт вращающееся магнитное поле, приводящее в движение магнитоабразивную среду производящую финишную обработку внутренней поверхности полого цилиндра из нержавеющей стали марки SUS304. Предложенный метод позволяет получать шероховатость Rmax=0,4мкм при исходных Rmax=4мкм, данный метод можно использовать для обработки изогнутых трубопроводов. Разработаны технологии финишной обработки, основанные на применении магнитореологических алмазных сред, позволяющие высокоточную обработку ситаллов, керамик, закаленных сталей и твердых керамических покрытий.

## Повышение качества изготовления сложнопрофильных поверхностей деталей двигателей летательных аппаратов

Лодянова В.И.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Токмакова Т.В.
МАИ, Москва
lodyanova@list.ru

Повышение качества и эксплуатационных характеристик деталей двигателей летательных аппаратов являются важными факторами, увеличивающими конкурентоспособность предприятия. Несмотря на то, что при изготовлении таких рабочих элементов турбины как моноколеса и лопатки, используются передовые технологии, достаточно велик процент бракованных деталей. Это вызывает сокращение объема производства готовой продукции.

Одним из способов повышения производительности изготовления сложнопрофильных поверхностей деталей является проведение промежуточного контроля. Такой вид контроля позволяет выявить ранние отклонения обрабатываемой поверхности от заданной конструктором и редактировать режимы финишной обработки для получения годной детали. Традиционно, для контроля поверхностей деталей, имеющих сложную форму, используются контактные способы измерений, характеризующиеся относительно невысокой производительностью.

Исследования, проведенные в данной работе, показали, что для проведения промежуточного контроля целесообразно использовать бесконтактную оптическую трехмерную измерительную систему, действующую на основе проецирования интерференционных полос на поверхность объекта и считывающую отраженный свет

камерой. Установлено, что использование источника голубого света делает систему нечувствительной к изменению освещенности окружающей среды, а также позволяет одновременно определять положение нескольких миллионов точек поверхности (производит оцифровку) объектов больших размеров, с блестящими и темными поверхностями. Кроме того система обеспечивает высокую точность и надежность измерений при высоком уровне производительности. Оборудование может эффективно функционировать как в лабораторных, так и в цеховых условиях. Так как сканер имеет алюминиевый корпус, герметично защищающий его от пыли, повышеной влажности и от физических воздействий. Измерительный комплекс позволяет автоматически объединять данные полученные в результате различных измерений.

Оборудование оснащено специальными щупами для измерения труднодоступных элементов, таких как глубокие отверстия, пазы, внутренние полости совместно с оптическим сканированием. Комплексное программное обеспечение дает возможность получать, обрабатывать и комбинировать данные, полученные от других измерительных систем: координатно-измерительных машин и лазерных сканеров.

Использование исследованного оборудования в качестве промежуточного этапа в процессе изготовления детали позволяет выявить значения отклонений фактической поверхности от заданной с целью последующей корректировки траектории финишной обработки изделия. Такой подход приводит к повышению качества обрабатываемых изделий и сокращению брака. Кроме того, данный комплекс может быть использован для контроля в процессе эксплуатации деталей, подверженных износу. Проведенные в работе исследования показали высокую эффективность использования системы бесконтактных оптических измерений на всех этапах технологического процесса: от разработки и конструирования, до производства и эксплуатации.

## Методика испытаний предохранительного клапана на воздействие вибрации

Миндлин В.Л.
Научный руководитель — Кириллин А.В.
МАИ, Москва
sevax23@mail.ru

Требования к точности и надежности деталей приборов и агрегатов определяются техническими условиями их испытаний, что в свою очередь вызывает необходимость создания определенных типов испытательного оборудования с заданными характеристиками испытательного воздействия [1].

Постоянное совершенствование ПГС ракетно-космической техники обусловлено повышением требований к работоспособности агрегатов автоматики, особенно при действии больших вибронагрузок, вызывающих, как правило, разгерметизацию клапанов, рассогласование настройки, разрушения тарели, седла и других элементов.

Методика проведения испытаний предохранительного клапана на воздействие вибрации заключается в подаче разных режимов вибрации на объект испытания, закрепленный на столе вибростенда. В момент проведения испытания определяют границу начала разгерметизации клапана. Минимальная перегрузка, при которой возможна разгерметизация клапана, пропорциональна величине поджатия контактной пары тарель-седло. Для обнаружения утечек газа, к выходной полости клапана подсоединяют трубку, другой конец которой опускают в прозрачную градуировочную емкость с водой. О разгерметизации клапана судят по появлению пузырьков газа в воде. Среднее значение утечки клапана определяют разделив общее количество газа, попавшего в градуировочную емкость, на время проведения эксперимента.

Предохранительный клапан давления служит для предохранения системы от чрезмерного повышения давления, ограничивая предельную величину давления.

Список используемых источников:

1. Бахвалов Ю.О., Грешняков П.И., Гимадиев А.Г. Исследование эффективности гидропривода с дискретным клапаном и коммутируемой трубкой. // Труды МАИ. 2017. № 96. С. 3.

## Многокомпонентное электроискровое легирование

Моени Табатабаи Д.М., Шахривар С.М.
Научный руководитель — доцент, д.т.н. Курицына В.В.
МАИ, Москва
saxar.shahrivar90@gmail.com

Анализируются особенности многокомпонентного электроискрового легирования (ЭИЛ) поверхностей с использованием материалов легирующих электродов (ЛЭ), содержащих необходимые компоненты, легирующих электродов, собранных из проволок различных материалов, а также комбинированных методов обработки (натирание металлическими и неметаллическими материалами обрабатываемой ЭИЛ поверхности, нанесение покрытия ионно-плазменным осаждением или гальваническим методом последующей обработкой ЭИЛ).

Получены аналитические зависимости позволяющие рассчитывать состав легированного слоя при обработке легирующим электродом из многокомпонентного материала, для ЭИЛ составным ЛЭ и при переплаве искровыми разрядами предварительно нанесенного покрытия. При способе многокомпонентного легирования, когда упрочненная поверхность формируется в результате многократного ЭИЛ легирующими электродами из различных материалов, материал каждого последующего ЛЭ "разбавляет" легированный слой, образовавшийся при предшествовавших проходах. Разработаны модели, алгоритмы и программы таких расчетов.

Показано, что для получения многокомпонентных покрытий эффективно использовать нанесение фрикционным путем на упрочняемую поверхность различных металлических и неметаллических материалов, с последующей их переплавкой электрическими разрядами. Эта технология была применена для получения антифрикционных покрытий (бронзовых, медных, бронзографитовых, железографитовых и др.).

Приводятся результаты экспериментальных исследований по нанесению многокомпонентных легированных слоев. Показано, что введение в межэлектродный промежуток веществ, образующих при воздействии электрических разрядов в результате плазмохимических реакций соединения, обладающие меньшей проводимостью и сопротивлением электрической эрозии, в ряде случаев позволяет в десятки раз увеличить перенос материала с анода на катод. Такое значительное повышение массопереноса, может быть объяснено с нескольких позиций:

- интенсифицируется нагрев легирующего электрода вследствие возрастания электрического сопротивления переходной зоны газ - анод, из-за образования на поверхности анода химических соединений;
- диссоциированные и ионизированные электрическими разрядами вещества производят электрохимическое и химическое разрушение материалов сопряженных электродов, в первую очередь ЛЭ;
- происходит дополнительное тепловыделение из-за протекания в межэлектродном промежутке экзотермических реакций.

Эффективность различных веществ будет зависеть от проявления указанных факторов. Исследования показали, что такая технология позволяет получать качественные

антифрикционные покрытия из мягких металлов и сплавов (медь, цинк, кадмий, серебро, бронзы, латуни и др.). В частности, ЭИЛ с введением соединения BN позволяет резко увеличить несущую способность поверхностного слоя при легировании титановых сплавов ЛЭ из алюминия, а соединений содержащих щелочной металл (K, Na, Li) и основную или кислотную группу (OH, SO3, SO4, CO3, MnO4, B2 O4, Br, J), - качественные медные покрытия на сталях, никелевых и титановых сплавах.

## Технологии ремонта и восстановления лопаток моноколес компрессора газотурбинного двигателя

Московсков А.О.
Научный руководитель — Земляная В.А.
МАИ, Москва
vickitambov@yandex.ru

По мере развития авиационного двигателестроения все более актуальными становятся проблемы повышения ресурса и надежности газотурбинных двигателей при условии одновременного сокращения затрат времени, труда и средств на проведение технического обслуживания и ремонта. В первую очередь, это относится к наиболее массовым и дорогостоящим деталям двигателя, какими являются лопатки компрессоров.

В настоящее время в авиационных двигателях начинают применяться роторы, выполненные по технологии Blisk. Суть технологии Blisk заключается в изготовлении моноколеса, т.е. диска с рабочими лопатками как единое целое. Однако для таких монолитных конструкций характерна сравнительно низкая ремонтопригодность.

Так, например, при поломке одной лопатки необходимо заменять всё колесо или часть барабана. При изготовлении моноколес методом скоростного плунжерного фрезерования на 5-6-координатных обрабатывающих центрах с числовым программным управлением в случае сбоя программ может происходить повреждение одной или нескольких лопаток в виде врезов или утончений пера лопатки. Таким образом, ремонт и восстановление изношенных или поврежденных поверхностей лопаток является одним из главных факторов повышения ресурса и надежности работы авиационных двигателей. Одним из эффективных методов восстановления поверхностей лопаток компрессора является сварка трением.

Для повышения ремонтопригодности блисковых моноколес предлагается металлосберегающая технология их изготовления. Суть этой технологии заключается в следующем. В случае, когда диск имеет высокий втулочный обвод сложной формы, предлагается изготавливать диск с невысокими привтулочными участками лопатки, а остальные части лопаток изготавливать отдельно. При этом отдельно изготовленный диск и рабочие лопатки соединяются сваркой линейным трением. Соединяемые поверхности диска и лопаток могут быть выполнены в форме наклонной плоскости, что не потребует производить при сварке движение обязательно в окружном направлении. Из недостатков предложенного метода сварки трением можно отметить очень высокую стоимость оборудования, сложность подготовки поверхностей под сварку, а также высокие требования к квалификации персонала,

Также был разработан метод изготовления рабочих моноколес компрессора, суть которого заключается в соединении электронно-лучевой сваркой укороченных лопаток диска рабочего колеса и отдельно изготовленного пера лопатки в различных вариантах исполнения.

Кроме того, предлагается способ ремонта и восстановления крыльчаток ротора турбомашин или рабочего колеса, при котором удаляют изношенную или поврежденную лопатку, оставляя на ободе диска ее основание, а по срезанной плоскости основания выполняют профильные шипы и пазы. Эквивалентную форму задают соединяемой с ней

поверхности новой лопатки. После соединения составные части стыкуемых поверхностей прихватывают между собой в точках контактной сваркой. Их соединения осуществляют пайкой или сваркой с использованием высокочастотного индуктора в среде аргона. Из недостатков предложенного способа можно выделить сложность изготовления и подгонки соединяемых поверхностей, а также опасная возможность получения деформаций рабочих лопаток моноколеса при пайке.

## Конструктивное совершенствование системы охлаждения на базе двигателя РД-33МК

Мунё С.И.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Силуянова М.В.
МАИ, Москва
mikes2000@mail.ru

Основными показателями, характеризующими авиационные ГТД, являются: удельная тяга, расход топлива, масса, а также ресурс. Основной путь, по которому шли все эти годы создатели ГТД – это освоение все более высоких начальных температур и давлений рабочего тела в цикле, т.е. «карнотизация» простого цикла.

Работы по повышению температуры газа ведутся в нескольких направлениях: первое – создание новых металлических сплавов с жаропрочными и жароупорными свойствами; второе – разработка керамических и спеченных материалов; третье – охлаждение горячих частей турбины. В настоящее время ведется интенсивная работа по усовершенствованию систем охлаждения горячих частей турбины, и в первую очередь, сопловых, рабочих лопаток, камер сгорания и дисков.

В настоящей работе проведены проектирование системы охлаждения и расчет термопрочностного состояния соплового аппарата ТВД двигателя РД-33МК, с учетом запаса температуры газа 70˚С на ресурсное проектирование, относящегося к температуре газа на входе в ТВД.

В работе представлены: конструктивное исполнение системы охлаждения СА ТВД; результаты расчета параметров потока газа в проточной части турбины; результаты расчета неравномерности температурного поля газа на входе в сопловую лопатку; результаты теплового расчета и распределение температур по перу лопатки; результаты гидравлического и прочностного расчета системы охлаждения СА ТВД;.

Целью данной работы является проектирование системы охлаждения и расчет термопрочностного состояния СА ТВД двигателя РД-33МК.

Расчеты проводились при помощи программ CFX и ANSYS.

## Применение инновационных технологий при создании многофункциональных фюзеляжей самолётов

Мусаева А.А., Котлярова Н.Ю.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Кубрин В.И.
МАИ, Москва
Messorem36@yandex.ru

В нашей стране с конца 90-х – начала 2000-х ведутся разработки «умной обшивки» самолёта, которая бы позволила сделать самолёт цифровым, обеспечивая лётчика полным информационным обеспечением. Но это оставалось невозможным, при использовании технологий прошлого поколения. И вот благодаря развитию инновационных технологий в

нашей стране, удалось создать обшивку, не имеющую аналогов в мире и на голову выше зарубежных разработок.

Инновационная обшивка получила название «Гималаи». Её предназначение заключается в повышении эффективности радиоэлектронной борьбы. Такая технология не только в разы увеличивает защиту самолёта от помех противника, но и увеличивает выживаемость самолёта в боевых условиях, обеспечивает малозаметность на радарах.

Наиболее значительными факторами, которые привнесли инновационные технологии, явились ощутимое снижение массы и экономическая эффективность данной технологии. Данный комплекс стал незаменимой частью самолёта. Это означает, что на предприятиях происходит изготовление не отдельных блоков, а целых частей самолётов со встроенными в них электронными компонентами. Данные технологии позволили сократить время выпуска самолёта

Фюзеляж самолёта покрыт «умной обшивкой» на 70%, что позволяет обеспечить обзор для пилота почти на 360 градусов, благодаря расположению шести радаров по периметру фюзеляжа самолёта. Перед фонарём с правой стороны расположен обнаружитель целей, а за кабиной пилота находиться инфракрасный датчик, позволяющий наблюдать за тем, что происходит за спиной самолёта.

Применённые инновационный материалы, представляют собой композиты, обладающие эффективной площадью рассеивания. Ключевой параметр в радиолокации составляет 0,5 метра квадратного и будет отражаться на радарах предметом, не превышающим размером волейбольного мяча.

Скептикам, считающим развитие технологий в данной сфере неэффективным использованием бюджета, пришлось признать своё поражение. Так как инновационные технологии в очередной раз показали высокую эффективность и являются неотъевлиемой частью двигателя прогресса.

## Применение инновационных технологий при создании многоцелевых самолётов пятого поколения

Мусаева А.А.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Кубрин В.И.
МАИ, Москва
Messorem36@yandex.ru

В наше время к самолётам предъявляют особые требования, выполнение которых невозможно без использования инновационных технологий. Современный самолёт должен достигать скорости сверхзвука (свыше 174м\с) без использования форсажа, так же обладать достаточной манёвренностью и устойчивостью к перевозкам. Быть максимально малозаметным и эффективным в боевых условиях.

Простая модификация самолётов серии 4 и 4+ будет недостаточна, необходимо создание самолёта 5-го поколения, отвечающего заявленным требованиям. И здесь на помощь пришли инновационные технологии, которые помогли найти изменения планера и фюзеляжа машины.

Было принято решение перейти на тип планера «Летающее крыло» разновидность «Безхвостки», по сути было убрано хвостовое оперение, что в свою очередь благотворно сказалось на манёвренности, массе и скорости самолёта, однако возникли проблемы с управляемостью: сваливанием и рысканьем. Дабы избежать сложностей с управлением нового типа самолётом, было принято решение создать инновационную систему ЭДСУ(электро-дистанционная система управления). Такая система позволила переложить на искусственный интеллект часть или при желании полное управление машиной.

Для повышения малозаметности самолёта были применены полимерные, керамические и углеволоконные покрытия, а так же композитные материалы с использованием радиоэлектронных компонентов для поглощения сигналов радаров.

Применений инновационных технологий снизило массу самолёта более чем на 20%, которую можно заполнить дополнительным количеством топлива и вооружением, возросла скорость и манёвренность машины.

Тип корпуса «Летающее крыло» и инновационные технологии позволили увеличить внутреннее пространство в самолёте даже при условии «сплюснутого» планера и позволили поместить вооружение в бомболюки, тем самым уменьшив сопротивление воздуха, повысив точность прицельного огня.

На самолёты нового поколения нанесено углеволоконное покрытие с применением радиоэлектронных компонентов, занимающих более 70% тела машины.

Таким образом, на данный момент уже достигнуты высокие показатели, которые казались просто невозможными ещё в 2000-х годах. Технологии постоянно развиваются и совершенствуются и двигаясь путём инновационных модернизаций и внедрением инноваций в производство можно выйти на совершенно новый уровень эффективности и многозадачности самолётов 5-го поколения.

## Упрочнение зубчатого венца детали «Водило правое» привода-генератора

Мухортов В.А.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Игнатов М.П.
МАИ, Москва
muhortov.valery@yandex.ru

Среди современных упрочняющих технологий, которые обеспечивают требуемые эксплуатационные характеристики зубчатых колес, особое место принадлежит химико-термической обработке (ХТО) [1].

Для эффективного упрочнения поверхности зубьев широко применяют цементацию, нитроцементацию, азотирование и такие современные методы, как ионную цементацию, ионную нитроцементацию и ионное азотирование. Каждый из этих способов отличаются насыщающей средой, оборудованием, технологическими возможностями, экономичностью и экологической чистотой. Влияниями этих факторов обуславливается различный механизм формирования диффузионного слоя, его состава, строения, а также свойств.

Цель цементации — это обеспечение необходимой насыщенности диффузионного слоя и высокого сопротивления контактным нагрузкам, а также силам трения при минимальных производственных затратах и времени обработки.

Нитроцементацию используют вместо цементации для деталей, толщина упрочненного слоя которых по условия работы может быть ограничена 1 мм. Этот процесс аналогичен цементации и проводится на том же оборудовании. Особенностью является процесс совместного насыщения поверхности углеродом и азотом, что значительно уменьшает деформации и коробление деталей.

Ионная цементация (ИЦ) — это процесс науглероживания в низкотемпературной углеводородной плазме тлеющего заряда. Данный процесс решает основные задачи ХТО за счет управления характеристиками диффузионного слоя и интенсификацией процесса науглероживания. ИЦ проводят в специализированных установках [2].

Важным преимуществом ионной нитроцементации можно отметить отсутствие внутреннего окисления легирующих элементов, являющегося основным фактором образования дефектных структур, что снимает ограничения на толщину диффузионного слоя и допустимую концентрацию азота [3]. Это позволяет значительно увеличить износостойкость и несущую способность деталей машин.

Устранение основных недостатков газового азотирования достигается путем диффузионного насыщения в плазме тлеющего заряда — ионном азотировании (ИА). ИА имеет множество преимуществ, главными из которых можно отметить возможность получения требуемой структуры и свойств слоя при значительном сокращении продолжительности диффузионного насыщения.

Замена газовой цементации на ионную позволит избавиться от таких операций как меднение и размеднение за счет использования специальных экранов, защищающих поверхности, которые не подлежат обработке, а также значительно сократить время технологической операции. Модернизация заводского технологического процесса может быть проведена с использованием установки для ионной цементации фирмы IPSEN.

Литература:

1. Лахтин Ю.М., Арзамасов Б.Н. Химико-термическая обработка металлов. — М.: Металлургия, 1985. — 265 с.

2. Управление химическим составом, структурой и свойствами зубчатых колес при химико-термической обработке / Н.М. Рыжов, Н.В. Горбалетов, Р.С. Фахуртдинов и др. // Вестник машиностроения. — 1985. — №9. — С. 16—20.

3. Производство зубчатых колес газотурбинных двигателей: П80 Произв.-практ. Издание / Ю.С. Елисеев, В.В. Крымов, И.П. Нежурин и др.; Под ред. Ю.С. Елисеева. — М.: Высш. шк.,. 2001. — 493 с.; ил.

## Исследование технологических возможностей применения нитевидных материалов в аддитивных технологиях для изготовления изделий в авиаракетостроении

Наветкин М.А.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Ильинская О.И.
МАИ, Москва
NikTevan@yandex.ru

Аддитивные технологии (AM – Additive Manufacturing), появившиеся в 80-ых годах прошлого века, получили бурное развитие. На данном этапе развития они вполне могут конкурировать с традиционными технологиями в мелкосерийном производстве сложных изделий, а так же в быстром прототипировании.

Большинство AM-машин основаны на селективном спекании металлического порошка лазерным или электронным лучом. Этот метод является одним из самых простых и позволяет создавать металлические изделия самых разнообразных форм. Но металлические порошки также являются и слабым местом данной технологии.

Изготовление металлических порошков является трудоемким процессом – технологии газовой, вакуумной и центробежной атомизации сложны, и, главное, не освоены отечественным производством. К условиям хранения порошков предъявляются особые требования, а из-за отсутствия общих стандартов появляются проблемы как во взаимозаменяемости порошковых материалов, так и в обеспечении одинаковых свойств изготавливаемых деталей. Приобретение отечественными предприятиями импортных AM-машин приводит к зависимости отечественной промышленности от зарубежных фирм – изготовителей AM-машин, которые зачастую производят и порошок для этих самых машин. При попытке использовать порошки других производителей никто не гарантирует сохранение качества изготовляемой продукции, а также, что AM-машина вообще будет работать. Для предприятий оборонного значения это совершенно недопустимо.

Оптовая цена порошковых материалов на внешнем рынке примерно такова: чистый титан – €230-400/кг; Ti-6Al-4V – €200-400/кг; сплав Co-Cr – €150/кг; сплавы Al – €70-90/кг; Inconel €25 – €75/кг (на условиях EXW, т. е. без НДС, таможенных, транспортных и других

затрат). Российским потребителям они обходятся как минимум вдвое, как правило – втрое дороже. При этом существует минимальный предел заказа – от 10 до 50 кг.

Поэтому исследование технологических возможностей применения отечественных нитевидных материалов в аддитивных технологиях для изготовления деталей в авиаракетостроении является актуальным.

В настоящее время существуют только 2 компании Sciaky и Honeywell Aerospace, которые занимаются изготовлением АМ-машин, использующих нитевидные материалы, но они отличаются крайне низкой точностью изготовления.

Основными проблемами, которые требуется разрешить, являются:

- выбор такого вида энергии, который обеспечит качественное соединение подаваемого материала с уже нанесенным материалом;
- получение заданной точности изготовления за счет обеспечения минимальных термических деформаций при создании изделия;
- выбор режимов сварки, обеспечивающих расплавление металла без выплеска.

Эти требования могут быть вполне удовлетворены импульсным и непрерывным лазерным излучением, которое уже давно применяется для сварки деталей малых толщин. В работе рассматривается возможность применения оборудования, основанного на этих принципах.

## О возможности применения модуля охлаждения сборного резца при обработке титановых сплавов

Осаченко М.Д.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Вовченко С.В.
ДГТУ, Ростов-на-Дону
www.14max.ru@mail.ru

Как конструкционный материал титановые сплавы (ТС) широко применяются в авиационной технике и в ракетостроении в связи с их малым удельным весом и высокой прочностью (особенно при повышенных температурах, сочетающейся с устойчивостью к разрушительному воздействию коррозии). Общее снижение веса позволяет увеличить полезную нагрузку, дальность действия и маневренность самолетов. Этим объясняются усилия, направленные на расширение применения титана в самолетостроении при производстве двигателей, постройке фюзеляжей, изготовлении обшивки и даже крепежных деталей.

Вместе с тем, ТС имеют более низкую, чем у жаропрочных сталей и сплавов тепло¬проводность. Как следствие, при резании титановых сплавов возникает температура, более чем в 2 раза превышающая уровень температур при обработке стали 45.

Известно, что применение СОЖ при обработке различных материалов благоприятно воздействует на процесс резания металлов: значительно уменьшается износ режущего инструмента, повышается качество обработанной поверхности и снижаются затраты энергии на резание. Однако в последнее время все чаще отказываются от использования смазывающе-охлаждающих жидкостей по экологическим соображениям, а также в связи с тем, что использование СОЖ может оказать вредное влияние на технологическую наследственность деталей из титановых сплавов.

Автором использован принцип сухого резания с комплексной системой охлаждения (КСО), основанной на применении фазовых переходов 1-го рода [1…2]. Выполнен расчет доли тепла, поступающего в резец при обработке титанового сплава ВТ3-1, сделан расчет тепловой трубы и количества легкоплавкого вещества, необходимого для стабилизации температуры резания при чистовом точении в течение периода стойкости.

На основании выполненных расчетов автором разработана конструкция модуля охлаждения сборного резца, который рекомендуется использовать при изготовлении деталей из титановых сплавов.

Список литературы

1. Патент РФ на полезную модель №111787 «Режущий инструмент», В.Л. Гапонов, В.И. Гаршин, Д.Ю. Дубров, Ю.С. Дубров, А.С. Цыновкин, Г.С. Николаева. Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей РФ 27 декабря 2011г.

2. Дубров Д..Ю. Повышение периода стойкости сборных резцов испарительным охлаждением при сухом резании [Текст]: Автореферат дисс….канд.техн.наук: 05.02.07 /Дмитрий Юрьевич Дубров.- Брянск.- 2015.-19с.

## Проектирование технологии изготовления формообразующего инструмента из порошковых материалов методом лазерного спекания

Подъяпольская Е.В.
Научный руководитель — профессор, к.т.н. Круглов Е.П.
КНИТУ-КАИ, Казань
Karolina.cati@yandex.ru

Сложным и трудоемким этапом в технологии литья по выплавляемым моделям является проектирование и изготовление формообразующего инструмента – пресс-форм для моделей и стержне. Как правило, пресс-формы изготавливаются из металлических и неметаллических материалов при помощи механической отработки, что вызывает длительность процесса и необходимость высокой квалификации у рабочих.

Одним из перспективных направлений ускорившее изготовление пресс-формы является метод прототипирования с лазерным спеканием металлического порошка. С помощью него пресс-форму можно изготовить за один-два дня.

Прототипирование – это послойное построение физической модели (прототипа) в соответствии с геометрией CAD-модели. Основное отличие этой технологии от традиционных методов изготовления моделей заключается в том, что модель создается не отделением материала от заготовки, а послойным наращиванием материала, составляющего модель, включая входящие в нее внутренние и даже подвижные части. А высокая степень автоматизации обеспечивает получение качественных и сравнительно недорогих моделей, затрачивая на их изготовление часы, а не дни и недели, как это было при использовании традиционных методов.

В открытом доступе сведений о свойствах материалов изготовленных данным способом не достаточно для рекомендации по внедрению в производство. Для решения этой задачи в работе выполнено исследование материала готовой пресс – формы, изготовленной путем лазерного спекания.

В рамках исследования были выполнены работы: спектральный анализ сплава, определение механических свойств при Т=200С, замер шероховатости, микроструктурные исследования.

Химический состав определялся спектральным анализом на оптико – эмиссионном спектрометре модели ARL3460 (сертификат №С-СН.МТ42.В.14298, регистрационный номер 16709.08) по ГОСТ 18895-81. При проведении анализа технической литературы установлено, что материал пресс-формы соответствует стали 07Х16Н4Д4Б-Ш. Сталь имеет высокие физические характеристики и стойкость к химическому воздействию, совмещает высокопрочные характеристики и хорошее сопротивление коррозии.

Механические свойства проводились на электромеханической универсальной испытательной машине LFM 100. Испытание на растяжение проводились при Т=200С по ГОСТ 1497-84, испытание на ударную вязкость по ГОСТ 9454-78. Измерение твердости

проводились на универсальном цифровом твердомере КВ750. Твердость на образцах определялась по Бринеллю согласно ГОСТ 9012-59 и составляет dотп = 3,10мм.

При сравнении со свойствами материала, изготовленного традиционным способом, материал изготовленный лазерным спеканием имеет преимущества по прочностным характеристикам.

Пластические и прочностные характеристики образцов изготовленных в поперечном и продольном сечении пресс-формы находятся на одном уровне, что подтверждает отсутствие анизотропии.

Снижение пластичности по сравнению с материалом изготовленного традиционным способом, возможно связанно с тем, что во время процесса происходит послойная закалка и поэтому материал становится менее пластичным.

Измерение шероховатости проводилось на портативном профилометре Surftest SJ-210 по ГОСТу 2789-73. В результате исследования получилось, что поверхность при использование аддитивной технологии составляет от Ra – 15мкм до Ra – 5,78мкм.

Например при литье по выплавляемым моделям получается, малая шероховатость поверхности формы при достаточно высокой огнеупорности и химической инертности материала позволяет получать отливки с поверхностью высокого качества. После очистки от остатков оболочковой формы шероховатость поверхности отливок составляет от Rz = 20 мкм до Ra - 1,25 мкм.

При определении плотности и пористости использовался ГОСТ 18898-89 (ИСО 2738-87) «Изделия порошковые. Методы определения плотности, содержания масла и пористости».

Плотность детали соответствует компактному материалу и составляет 7,8г/см2.

Структурное исследование показало, что в детали при лазерном спекании пористость отсутствует.

Выводы

Применение лазерного спекания позволяет:

- Повысить механические свойства
- Получить материал детали с анизотропными свойствами
- Возможность получения заданной шероховатостью
- Сократить технологический цикл изготовления формообразующего инструмента
- Получить плотную, однородную структуру

Список литературы

1. Шкленника Я.И. и Озеров В.И. Литье по выплавляемым моделям. Изд. 2-е, переработанное и дополненное, Машиностроение, 1971 – 436с.

2. Ильюшенко Н., Уланович А., Селезнев В.А. Компьютерные 3D технологии и прототипирование при разработке и изготовлении моделей технических устройств. В кн.: Научное сообщество студентов XXI столетия: материалы III студенческой международной заочной научно-практической конференции. Часть IV. (23 мая 2012 г.)- Новосибирск: Изд. «Сибирская ассоциация консультантов», 2012. – с. 147-153.

## Снижение эмиссии вредных веществ в камере сгорания газотурбинной установки с помощью каталитического горения

Поспелов А.Р.

Научный руководитель — доцент, к.т.н. Ильинская О.И.

МАИ, Москва

rafleo1994@mail.ru

Увеличение в последние десятилетия масштабов промышленного применения газотурбинной техники в авиации и наземных установках поставило перед разработчиками совершенно новые задачи. Среди них наиболее сложной является обеспечение

экологической безопасности при эксплуатации авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) и наземных газотурбинных установок (ГТУ). Прежде всего, это относится к снижению загрязнения атмосферы вредными веществами, образующимися при сгорании углеводородных топлив.

Для обеспечения перспективных норм на эмиссию вредных веществ необходимо разрабатывать новые перспективные малоэмиссионные камеры сгорания (КС). Основной экологической проблемой для промышленных ГТУ, работающих большую часть своего ресурса на повышенных режимах, является проблема снижения оксида азота (NOx).

В настоящие время принято выделять четыре основных механизма образования оксидов азота при горении углеводородных топлив:

- термический – окисление азота в зонах высоких температур камер сгорания;
- быстрый – через взаимодействие N2 с углеводородными радикалами;
- N2O механизм – через реакцию с образованием N2O как промежуточного компонента;
- топливный механизм – через реакцию перехода в окись части азота, содержащегося в топливе в химически связанном виде.

В работе рассмотрены следующие традиционные методы снижения вредного воздействия при работе ГТУ:

- схема RQL, горение обогащённой смеси с последующим быстрым подмешиванием воздуха и догоранием обедненной смеси (Reach Quench Lean);
- схема LPP, горение обедненной предварительно смешанной и испаренной смеси (Lean Premixed Prevaporized);
- схема LDI, горение с впрыском обедненной смеси непосредственно зону горения (Lean Direct Injection);
- модификация существующих КС;
- схема каталитического горения.

Использование катализаторов в камере сгорания ГТУ давно привлекает разработчиков большими потенциальными возможностями по снижению вредных выбросов. Использование катализатора позволяет окислять топливо при температуре значительно ниже «бедного горения» предела воспламенения. Особое внимание стоит уделить новой схеме организации рабочего процесса в каналах катализатора. Применение компланарно-пересекающихся каналов каталитического блока обладает меньшими потерями полного давления, большей равномерностью структурного потока и более высокой степенью закрутки микровихревых структур по сравнению с другими формами.

Каталитическое окисление (горение) на сегодня является наиболее эффективной технологией сжигания топлив в тепловых двигателях. Катализаторы обеспечивают:

- высокую полноту сгорания;
- минимальные выбросы загрязняющих веществ в отходящих газах;
- значительную (до 20%) экономию газомоторного топлива на транспорте;
- повышают ресурс работы и эксплуатационные свойства двигателей.

## Развитие исследований тепловых процессов при механической обработке деталей ГТД

Пушной А.А.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Безъязычный В.Ф.
РГАТУ им. П.А. Соловьёва, Рыбинск
AndreyPyshnoy@yandex.ru

Растущие требования к эксплуатационным характеристикам изделий зачастую ставят задачу повышения параметров точности входящих в изделие деталей. В связи с этим

постоянно увеличивается номенклатура и объемы выпуска высокоточных деталей. Становиться обычной практикой, что при конструировании изделий допуски на размеры прецизионных деталей назначают в микрометрах и долях микрометра.

Для обеспечения заданных параметров точности деталей необходимо понимать сущность возникающих при обработке тепловых процессов, и связанных с ними деформаций обрабатываемой детали и режущего инструмента.

Рассматривая вопрос изучения тепловых явлений в зоне резания, необходимо обратиться к работам выдающихся ученых в области технологии машиностроения, изучавших влияние тепловых явлений: Резникова А. Н., Макарова А. Д., Силина С. С., Талантова Н. В., Полетики М. Ф., Максарова В. В. [2, 3], а также зарубежных авторов.

В зоне резания присутствуют три источника тепловых потоков: теплота, возникающая в результате трения между обрабатываемой деталью и режущим инструментом, теплота, возникающая в результате трения между стружкой режущим инструментом, а также теплота, выделяемая в результате деформаций снимаемого слоя [4].

Выполненные исследования позволяют определить температуры, возникающие в зоне основных деформаций металла снимаемого припуска, в объемном источнике теплоты, расположенном перед режущим инструментом и возникающем в результате деформаций в поверхностном слое детали, а также для и в объемного источника теплоты на площадке контакта режущего инструмента и детали. Они учитывают такие параметры как скорость резания, теплопроводность материала детали и его удельную объемную теплоемкость, толщину среза, угол наклона условной плоскости сдвига, размер источника тепла и другие [1].

Резникову А. Н. и Силину С. С. удалось разработать расчетные схемы тепловых потоков в изделии, режущем инструменте и стружке, а также определить интенсивность их тепловыделения [4 и 5]. В частности, интенсивность тепловыделения в условной вершине режущего инструмента при резании материалов будет равна произведению сопротивления обрабатываемого материала пластическому сдвигу, скорости резания и косинусу угла наклона условной плоскости сдвига. Так же ими были выведены формулы для расчетов интенсивности тепловыделения для первого, второго и третьего источников тепла.

На основе расчетов температур в поверхностном слое для каждого источника тепла и обработки результатов расчета была получена упрощенная формула для определения температуры в поверхностном слое детали [1].

Полученная зависимость позволяет определять скорость резания при лезвийной обработке и оптимальную скорость резания, соответствующую оптимальной температуре резания, при которой будет наблюдаться минимальный износ режущего инструмента. Ко всему прочему было установлено, что оптимальная температура резания обеспечивает наиболее благоприятные параметры качества поверхностного слоя обработанной детали.

Таким образом результаты выше изложенных исследований позволили повысить точность выполняемых расчетов погрешностей лезвийной обработки, зависящих от теплового воздействия на режущий инструмент и обрабатываемую заготовку.

Литература

1. Безъязычный В. Ф. Метод подобия в технологии машиностроения. –
М. Машиностроение, 2012, 320с.

2. Красный В. А., Максаров В. В. Триботехнические характеристики деталей горных машин с регулярной микрогеометрической поверхности / Металлообработка, № 1. Т. 2016. С. 29 – 35.

3. Максаров В. В., Леонидов П. В. Моделирование и управление динамическими свойствами технологических систем / Записки Горного института, № 209. Т. 2014.
С. 71 – 77.

4. Резников А. Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. –
М. Машиностроение, 1981, С.279.

5. Силин С. С. Метод подобия при резании материалов. – М. Машиностроение, 1979, С.152.

# Конструктивное совершенствование системы охлаждения лопатки турбины методом калориметрирования

Ремчуков С.С.
Научный руководитель — профессор, к.т.н. Ярославцев Н.Л.
МАИ, Москва
remchukov.sviatoslav@yandex.ru

Требования высокой экономичности и улучшения параметров ГТД обусловливают необходимость повышения эффективности систем охлаждения ГТД. Наиболее простым и эффективным способом получения нормативного распределения температурного поля является вынужденная интенсификация теплообмена путем заполнения воздушного канала телами, создающими гидравлическое сопротивление и турбулентность в потоке. Наиболее распространенной системой интенсификации теплообмена являются взаимоскрещивающиеся ребра, «набивки Френкеля».

Объектом доводки является охлаждаемая рабочая лопатка первой ступени турбины с вихревыми матрицами, установленными в ее передней и задней полостях.

Отработка конструкции проводилась по технологии модульной доводки. Были изготовлены упрощенные (по материалу и конфигурации) модели, которые и подвергались исследованию.

Экспериментальные исследования лопатки и её упрощённых модулей проводились методом калориметрирования в жидкометаллическом термостате. Упрощенные модули различались по параметрам оребрения, что позволило модернизировать конструкцию матрицы для получения нормативного распределения температурного поля по поверхности лопатки. Также были получены критериальные уравнения и номограммы, позволяющие аналитически прогнозировать теплогидравлические характеристики вихревых матриц в зависимости от параметров оребрения в широком диапазоне режимных параметров испытаний. На основании выполненных экспериментально -расчетных мероприятий и анализа результатов аналитического прогнозирования определены оптимальные параметры оребрения вихревой матрицы при заданных по проекту ее габаритных размерах.

Исходя из полученных конструктивных рекомендаций методом точного литья по выплавляемым моделям была изготовлена базовая лопатка, которая в дальнейшем испытывалась калориметрическим способом. Результаты проведенного анализа показали, что температурное состояние удовлетворяет нормативному, за исключением участка входной кромки. С целью получения нормативного распределения температурного поля по поверхности передней полости лопатки были предложены следующие конструктивные изменения:

-изменение ширины вихревой матрицы;

- изменение внутреннего радиуса входной;

-установка тонкой пластины между вершинами смежных взаимоскрещивающихся ребер;

-выполнение сквозного канала в зоне входной кромки.

Проведенное исследование влияния изменения ширины вихревой матрицы на теплогидравлические характеристики показало, что целесообразно снижение направляющей перегородки, оформляющей переднюю полость базовой лопатки, в сторону входной кромки на 1,5 мм, что приведет к увеличению (на 5-6%) теплосъема м данной области пера при незначительном увеличении гидравлических потерь (на 2-3%).

Результаты испытаний по изменению радиуса входной кромки показали, что выполнение лопатки с постоянным по высоте пера радиусом входной кромки, равным 1,1 мм, обеспечивает снижение гидравлического сопротивления на 3-7% при увеличении теплосъема с входной кромки на 4-6%.

Создание канала в зоне входной кромки модификаций лопатки способствует росту пропускной способности при невысоком увеличении теплосъема, согласно результатам исследований. Однако, рост теплосъема наблюдается преимущественно в прикорневом сечении входной кромки.

Установка тонкой проставки (фольги) между вершинами смежных, взаимоскрещивающихся ребер по всей высоте лопатки, привела к улучшению гидравлических характеристик на 20%, а на одну треть высоты – на 10%. При этом теплосъем увеличивается на 15 и 10%, соответственно, при снижении теплосъема с боковых поверхностей на 10-20%.

Указанные мероприятия (модернизация конструкции передней полости лопатки с вихревыми интенсификаторами теплообмена) по обеспечению нормативного теплового распределения не привели к желаемому результату. В соответствии с вышеизложенным было принято принципиально новое решение конструктивного исполнения входной кромки проектируемой лопатки, а, именно, использование циклонно-вихревой системы охлаждения.

На основании проведенного анализы была предложена конструкция лопатки полупетлевой системы охлаждения. В передней полости лопатки в зоне входной кромки по всей ее высоте имеется сквозной канал переменного сечения, соединяющийся через отверстия, выполненные по касательной к его внутренней поверхности, с подводящими каналами (со стороны спинки лопатки) вихревой матрицы. Подбором диаметра жиклера в передней полости лопатки удалось добиться нормативного температурного распределения указанной области проектируемого объекта при условии сохранения требуемой пропускной способности.

Проведенные гидравлические и тепловые исследования лопатки предлагаемой конструкции, выполненной методом точного литья по выплавляемым моделям, показали удовлетворительную сходимость реальных и нормативных характеристик.

## Определение дифференциальных сечений неупругого рассеяния электронов в вольфраме из спектров характеристических потерь энергии

Рыбакова А.В., Грязев А.С., Субботин Н.Ю.
Научный руководитель — профессор, д.ф-м.н. Афанасьев В.П.
НИУ МЭИ, Москва
kuznetzav@gmail.com

Центральной проблемой количественной электронной спектроскопии является отсутствие надежных данных по дифференциальным по энергии сечениям неупругого рассеяния. Задача восстановления таких сечений из экспериментальных данных является обратной и относится к категории некорректных задач математической физики. Для анализа воспользуемся моделью, которая позволяет интерпретировать спектры от модельного образца из двух и более слоев [1]. Мы считаем образец однородным с точки зрения процессов упругого рассеяния. Но с точки зрения процессов коллективных потерь энергии сечения различаются в приповерхностном слое и однородном массиве мишени, удаленном от поверхности.

В предыдущей работе [2] сечения восстанавливались из спектров рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и спектроскопии характеристических потерь энергии (ХПЭ) в геометрии «на прострел».

Следующим шагом в изучении образцов вольфрама стало восстановление сечений неупругого рассеяния из спектров ХПЭ в геометрии «на отражение». Для этой работы были выбраны спектры с интервалом начальных энергий электронов от 1000 эВ до 3400 эВ.

Результатами работы являются восстановленные дифференциальные сечения неупругого рассеяния электронов. В работе показано, что вид сечений меняется в

зависимости от начальной энергии, поэтому каждый спектр должен быть рассмотрен отдельно для более точного анализа.

Для развития методики анализа электронных спектров и корректной интерпретации, методики восстановления сечений должны совершенствоваться, а для этого необходима обработка большего количества экспериментальных данных. Причем в дополнение к этому важна и корреляция восстанавливаемых сечений между собой. Если получаемые характеристики неупругого рассеяния позволяют корректно описать спектр для однородных материалов, далее требуется развитие этих методик для неоднородных материалов.

В работе показаны возможности повышения качества анализа для сигналов электронной спектроскопии, а также высокая эффективность применения методов электронной спектроскопии при анализе поверхности, дающем детальную информацию о химическом составе и структуре твердых тел.

Список литературы

1. Afanas'ev V.P., Gryazev A.S., Efremenko D.S., Kaplya P.S. Differential inverse inelastic mean free path and differential surface excitation probability retrieval from electron energy loss spectra // Vacuum, 2017. V.136. P. 146-155.

2. Afanas’ev V.P., Gryazev A.S., Efremenko D.S., Kaplya P.S., Kuznetcova A.V. Extracting the differential inverse inelastic mean free path and differential surface excitation probability of Tungsten from X-ray photoelectron spectra and electron energy loss spectra // Journal of Physics: Conference Series, 2017, V.941, P.012019.

## Исследование технологии заправки двигательной установки космического назначения высококипящими компонентами топлива

Рябышников А.С.
Научный руководитель — профессор, д.ф-м.н. Невровский В.А.
МАИ, Москва
pursik5@yandex.ru

Настоящее исследование посвящено разработке одной из операций подготовки космического аппарата к работе на орбите - технологии наземной заправки его двигательной установки (ДУ). Особенностями работы такой установки являются многократные запуски двигателя в условиях невесомости и импульсный режим работы. Применяемые в системе подачи компонентов топлива конструктивные решения, связанные с этим, накладывают свой отпечаток на технологию заправки ДУ.

Для отработки технологии был создан стенд вакуумной заправки емкостей окислителя и горючего ДУ. В данной работе рассматриваются особенности вакуумной стендовой заправки, рассчитаны основные характеристики, необходимые при заправке двигательной установки, и с учетом конструкции баков разработана технология заправки ДУ. Стенд предназначен для заправки ДУ с вытеснительной системой подачи компонентов. Была разработана схема стенда, выбраны элементы схемы (датчики давления, клапаны, расходомеры и т.д.) и собран стенд. Была разработана процедура заправки с учётом тех ограничений, которые накладываются на работу ДУ характеристиками компонентов и её конструктивными особенностями.

Особенность конструкции баков рассматриваемой ДУ заключается в том, что мембрана, разделяющая газовую и жидкостную полость, выдерживает перепад давления, не превышающий 0,15 ат. Однако компонент «Амил» при попадании в вакуумированную жидкостную полость бака мгновенно вскипает до 1 ат, а это неизбежно приводит к разрушению мембраны. Поэтому заправлять компонент классическим способом, передавливая компоненты из стендового бака за счет избыточного давления, невозможно.

В данной работе предложен альтернативный способ заправки. Для этого предлагается при заправке перед баком окислителя установить пароаккумулятор.

Пароаккумулятор представляет собой герметичный бак объемом 25л, и заправленный компонентом «амил» в количестве 10 л.

В данной системе пароаккумулятор предназначен для предварительной подачи паров амила в бак окислителя ДУ и выравнивания таким образом давления на обеих сторонах мембраны. Затем заправка бака окислителя осуществляется методом ступенчатой заправки по разработанной циклограмме. При достижении необходимого количества компонента в баке ДУ заправка прекращается.

В данной работе представлены расчеты количества и парциального давления азота в жидкостной полости баков, которые показали что оптимальным объемом заправки бака окислителя является 30 литров. При данном объеме заправки выделение газа из компонента прекращается. Соответственно дальнейшая заправка происходила бы только за счет сжатия ранее выделившегося газа, а это неизбежно привело бы к резкому возрастанию давления в баке, что не допустимо для конструкции баков, т.к. их прочность ограничена.

Список литературы:

1. _ Добровольский М.В. “Жидкостные ракетные двигатели”, М.: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2005, 488с.
2. Галеев А.Г.,Денисов К.П., Ищенко В.И., Лисейкин В.А., Сайдов Г.Г., Черкашин А.Ю.“Испытательные комплексы и экспериментальная отработка жидкостных ракетных двигателей”М.:«Машиностроение/Машиностроение – Полет», 2012. 368 с.
3. Галеев А.Г. Основы устройства испытательных стендов для отработки жидкостных ракетных двигателей и двигательных установок, издательство ФКП “НИЦ РКП”, 2010.180 с.

## Оптимизация геометрии эвольвентных зуборезных долбяков с использованием численных методов поиска нуля функции

Савельев С.В.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Волков Д.И.
РГАТУ им. П.А. Соловьёва, Рыбинск
savelevvv19992@mail.ru

Зуборезные долбяки, являются наиболее универсальным инструментом, работающим по методу обката. Применение долбяков обычно обусловлено невозможностью изготовления требуемого зубчатого колеса другими видами инструмента, либо невозможностью обеспечить требуемую точность по нормам плавности, без применения отделочных операций. Такие широко используемые в авиадвигателестроении детали как, точные шевронные колеса без канавки между ветвями, блоки зубчатых колес коробок скоростей, зубчатые колеса внутреннего зацепления и втулки эвольвентного шлицевого соединения, во многих случаях, реально изготовить только с применением зуборезных долбяков.

В большинстве случаев, методики рассчета долбяков, в силу невозможности аналитического решения задачи, сводятся к тому, что по приближенным зависимостям, номограммам или таблицам назначаются величины положительного и отрицательного смещения, которые в последствии проверяют на предмет удовлетворения определенных условий, невыполнение которых, является поводом для изменения исходных данных, повторного расчета и проверки.

Основным недостатком описанного подхода является не только длительный перебор различных вариантов в случае не выполнения тождеств, но и занижение возможного ресурса инструмента, вызванного тем, что в большинстве случаев значения смещений полученные по приближенным формулам, не являются максимально-допустимыми. Тем не менее, после

выполнения успешной проверки эти данные зачастую, без корректировок, наносятся на чертеж.

Наиболее современным подходом к решению задачи можно считать проектирование долбяка численными методами. Данная методика, хоть и сложна в ручных расчетах, однако обладает максимальной адекватностью, и является более простой при реализации, высоко-универсальной математической модели в программной среде, т.к. весь алгоритм проектирования сводится к решению известного набора трансцендентных уравнений.

Выходными данными по окончанию расчета, являются значения смещений, полученные по каждому ограничению, из которых в дальнейшем остается только выбрать наименьшее положительное и отрицательное. В конечном итоге, получается долбяк, имеющий при установленных исходных данных, максимально возможное количество переточек, что существенно повышает его экономическую эффективность. Однако данный подход позволяет рассчитать, только наилучший вариант при известном наборе исходных данных, что при постановке оптимизационной задачи поиска наиболее экономически выгодной конструкции, будет не совсем корректно.

Изменяя такие параметры, как число зубьев долбяка и его коэффициент головки зуба, существует возможность, найти сочетание, при котором параметры зубчатого колеса останутся в допустимых пределах, а оптимальные значения смещений будут заметно выше первоначального варианта. Таким образом, алгоритм поиска максимально-допустимых величин смещений, может быть только частью, более сложной оптимизационной задачи.

Результатом решения, при данной постановке, будет наилучшая комбинация исходных данных и оптимальные величины смещений для них. Стоит отметить, что выходные данные, могут быть представлены в виде графиков, построенных по множеству точек, рассчитанных для каждого ограничения, при последовательном изменении величины оптимизируемого параметра. Подобное представление, позволит в полной мере оценить влияние проводимых приращений и в случае надобности, сделать определенные допущения в ограничивающих условиях.

## Оценка качества 3D-печати тестового образца из металлополимерной композиции

Тарасов В.А.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Воронин С.В.
СНИУ им. С.П. Королёва, Самара
tarasov.ali@yandex.ru

Предложенная ранее технология аддитивного формования порошков, включает в себя технологию инжекционного формования и аддитивных технологий. Данная технология состоит из ряда этапов. На первом этапе происходит равномерное перемешивание порошка со связующим материалом при температуре 2000С и прессование данной массы через фильеру диаметром 1,75 мм. [1]. Полученная заготовка в виде проволоки устанавливается в экструдер 3D-принтера. Далее осуществляется процесс 3D-печати в результате которой формируется основная геометрия изделия [2].

3D-печать изделия является одним из основных этапов технологии аддитивного формования порошков. При отработке технологических параметров процесса 3D-печати важно оценивать качество получаемых деталей.

Поэтому целью данной работы является оценка точности воспроизведения заданных в модели геометрических размеров при 3D-печати тестового образца из металлополимерной композиции.

В качестве основного критерия в данной работе было выбрано соответствие геометрических параметров виртуальной и натурной модели. Дополнительно определялась

плотность полученной модели, от которой, во многом, зависят прочностные характеристики получаемых деталей. Для решения поставленной задачи в нашем исследовании был выбран эталонный образец, представляющий собой прямоугольный параллелепипед с размерами 15х15х5 мм. Для обеспечения высокой адгезии образца были выбраны следующие параметры печати: скорость печати – 30 мм/сек; температура – 230 0С; начальная высота слоя – 0,3 мм; скорость печати первого слоя – 30 мм/сек; скорость заполнения – 60 мм/сек.

По указанным выше технологическим параметрам 3D-печати был получен натурный образец с габаритами 15,8х15,88х5,27 мм. Определив массу полученного образца, которая составила 4,05 г, и, зная геометрические размеры, была определена плотность образца – 3,06 г/см3.

В результате проведенной работы, можно сделать предположение, что при проектировании деталей, преимущественно с прямолинейными поверхностями, для изготовления их по технологии аддитивного формования порошков, необходимо учитывать отклонения от номинальных размеров приблизительно на 5%. Так как отклонения горизонтальных размеров составили 5,86% и 5,33% соответственно, а отклонение по высоте составило 5,4%.

Литература

1. Пархоменка А.В. Наукоемкая технология инжекционного порошкового формования металлических деталей (МИМ-технология) // А.Д. Пархоменко, А.П. Амосов, А.Р. Самборук С.11// Наукоемкие технологии в машиностроении – 2012 - №12 – С.14.

2. Тарасов В.А. Технология изготовления единичных деталей методом аддитивного формования порошков // В.А. Тарасов, С.В. Воронин С.168 // Международная молодежная научная конференция «XIV Королёвские чтения»: сборник трудов 3-5 октября 2017 года. – Самара: Издательство Самарского университета, 2017. – В 2т. Т.1. – 573 с.

## Экспертная оценка при выборе метода чистовой обработки тонкостенных деталей на примере детали «Кольцо демпферное»

Титова Е.Д.
Научный руководитель — Мартынюк А.В.
МАИ, Москва
katya.t2604shodnya@yandex.ru

Тонкостенные детали в настоящее время имеют широкое применение в авиационной и ракетной технике. Одной из главных проблем таких деталей является точность изготовления.

На точность изготовления деталей оказывает влияние погрешность (систематическая или случайная).

Основные причины, влияющие не неточность изготовления деталей: износ режущего инструмента, тепловые деформации элементов технологической системы, погрешность установки заготовки, неправильная установка режущего инструмента, отжатие инструмента при обработке, наличие погрешностей сборки приспособления, нестабильность процесса обработки, некачественная заготовка или плохая очистка рабочей зоны.

Для повышения точности деталей требуется использование высокоточного оборудования и оснастки, повышенные требования к вибрациям оборудования, требования к температурному режиму в помещении и другие требования к производству.

В данной работе на примере детали «Кольцо демпферное» исследуем основные параметры, влияющие на точность изготовления тонкостенных деталей.

Кольцо демпферное - тонкостенное кольцо из конструкционной рессорно-пружинной стали, используемое в подшипниках в демпферных опорах двигателей. Так как деталь

является тонкой и упругой, то при ее изготовлении существуют определенные сложности в достижении необходимой точности размеров.

Окончательно деталь изготавливается методом шлифования наружных и внутренних карманов.

Целью данной работы является оценка факторов, влияющих на точность изготовления детали. Для этого были использованы следующие методы: метод оценки по бальной шкале, ранжирование, метод парного сравнения.

Для изучения данной проблемы были выделены 2 наиболее важных фактора:

1) точность установки детали и инструмента – оснастка повышенной точности;
2) альтернативные методы обработки

Были изучены несколько видов оснастки для установки и закрепления детали, такие как: оправки, цанговые патроны, гидропластовый и термопластовые патроны. Произведен сравнительный анализ использования данной оснастки. Гидропластовый и термопластовые патроны оказались лучшими средствами для закрепления демпферного кольца. Термопатрон выигрывает по таким показателям как жесткость, биения, дисбаланс и удобство использования. При этом не на много хуже него гидропатрон, которой к тому же имеет полости, заполненные жидкостью, за счет которых снижаются вибрации. Так же гидропартрон не требует вложений в специальные установки для нагрева или охлаждения оправки.

Так же были изучены альтернативные методы обработки кольца: электроэрозионная и плазменная. Для оценки параметров этих методом и возможности их использования была составлена экспертная группа и проведен анализ следующих критериев: стоимость оборудования, затраты на инструмент, необходимость использования специального оборудования и оснащения, трудоемкость, производительность, шероховатость обработанной поверхности, геометрическая точность размеров, возможность применения в мелкосерийном производстве. В результате такого анализа был сделан вывод о том, что в качестве чистовой обработки наиболее целесообразно использовать электроэрозионную обработку и шлифование, но стоит учитывать, что при электроэрозии не происходит прогиба детали и инструмента, но так же этот процесс является достаточно длительным по сравнению с шлифованием.

## Методология измерений при вибродинамических испытаниях

Тормозов А.Е.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Рожков В.Н.
МАИ, Серпухов
sashok8632@mail.ru

Система сбора данных (ССД) – система, осуществляющая сбор информации о значениях физических параметров, полученных от датчиков, установленных на объекте исследования, предварительную обработку, накопление информации и передачу её в компьютер.

В предварительную обработку информации входят:

- Схема согласования с датчиком (источником сигнала)
- Гальваническая развязка – общий принцип электрической изоляции рассматриваемой электрической цепи относительно других цепей, присутствующих в данном устройстве.
- Аналоговая обработка – математический алгоритм, обрабатывающий сигнал, представленный аналоговой электроникой, в котором математические значения представлены непрерывными физическими величинами, например, напряжением, электрическим током или электрическим зарядом.

- Аналого-цифровое преобразование – преобразование входного аналогово сигнала в цифровой сигнал (двоичный код).
- Цифровая обработка сигнала – обработка сигналов, представленных в цифровой форме в виде последовательности отсчётов сигнала с заданным периодом дискретизаци

Ракетно-космическая отрасль предъявляет повышенные требования к своей продукции. Учитывая большой объем работ и их трудоемкость, представить современные испытания без автоматизированных систем измерения невозможно.

Платы формирования содержат аналоговые схемы для конкретных преобразователей.

Их основная задача состоит в том, чтобы оптимизировать преобразование сигнала с датчика, например, ускорения, силы или деформации в чистое и надлежащим образом масштабированное напряжение на входе аналого-цифрового преобразователя в процессоре сигналов. Кроме того, формирователи могут обеспечивать датчики питанием, применять фильтрацию, считывать информацию, содержащуюся в датчиках и обнаруживать состояние перегрузки.

Сспиcок литературы

1. LMS Instruments //Техническое описание системы измерения SCADASIII – 2004.
2. Крюков В. В. 3. Системы сбора данных // Информационно-измерительные системы. — Владивосток: ВГУЭС, 2000. — 93 с.
3. Р. Бейкер Введение в вибрацию // LING DYNAMIC SYSTEMS – ISO 9001 – 1994.
4. Стандарт предприятий на наземную отработку
5. ГОСТ 30630.0.0-99. Методы испытаний на стойкость

## Восстановление и повышение прочностных характеристик соединительных узлов цилиндрических корпусных конструкций летательных аппаратов

Феоктистов В.А.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Махров В.П.
МАИ, Москва
fetis943@mail.ru

Технология ультразвуковой обработки может существенно повысить срок службы соединительных узлов цилиндрических корпусных конструкций летательных аппаратов, а так же увеличить их прочностные характеристики путем воздействия мощных ультразвуковых колебаний.

Качество поверхностного слоя оказывает большое влияние на усталостные явления,трение, износ и другие характеристики. В процессе ультразвуковой обработки инструмент пластически деформирует поверхностный слой металла. При этом температура в зонах контакта инструмента и обрабатываемой поверхности не превышает 100°С.

Результатом ультразвукового поверхностно пластического деформирования является:

Увеличение микротвердости поверхностного слоя. Которое происходит благодаря увеличению плотности дислокаций.

Выглаживание поверхности, убираются задиры и раковины на поверхности металла. Происходит уменьшение высоты неровностей в следствии чего уменьшается возможность возникновения усталостных трещин на поверхности детали. Как следствие увеличивается предел усталостной прочности.

Улучшение поверхностного слоя металла при поверхностно пластинчатом деформировании ультразвуковыми колебаниями, снижение шероховатости,увеличение микротвердости, снятие усталостных напряжений ведут к увеличению изностойкости.

Так же результатом ультразвуковой обработки является повышение герметичности резьбовых и других соединений.

Эксперименты показали, что еще одним эффектом ультразвуковой обработки является увеличение предела прочности на растяжение.

Описанные выше эффекты могут увеличить срок службы соединительных узлов цилиндрических корпусных конструкций летательных аппаратов и повысить их прочностные характеристики.

## Разработка технологий получения карбидокремниевых монокристаллов для перспективного электрооборудования летательных аппаратов

Фертиков А.О.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Силуянова М.В.
МАИ, Москва
alexfertikov@gmail.com

В настоящее время предприятия российской авиационной промышленности вынуждены искать новые пути развития производства бортового электрооборудования, т.к. эксплуатация нынешних электронных систем связана с такими рисками и их недостатками, как: отсутствие надежных зарубежных поставщиков готовых изделий, комплектующих и сырья в условиях санкций; наличие потенциально опасных «закладок» и брешей для внешнего воздействия в схемах иностранного оборудования, способных привести к отказу систем управления летательным аппаратом; низкая стойкость к сверхвысокочастотным (далее СВЧ) колебаниям и электромагнитным воздействиям; узким диапазоном рабочих температур; плохой работоспособностью классических радиолокационных систем в условиях запыленности окружающего пространства или воздействия посторонних шумов; высокими масса-габаритным параметрами, низкой емкостью и высокой степенью энергопотребления и т.д.

Формирование новой отечественной элементной базы для электрооборудования позволит нивелировать вышеуказанные риски и вредные факторы. В основе ее создания лежит применение новых материалов, одним из которых является карбид кремния. И на сегодняшний день, это наиболее востребованный материал.

Кристаллы карбида кремния (далее ККК) по прочности, вязкости разрушения и коэффициенту термического расширения соответствуют металлам, но превосходят их по твердости, износостойкости, химической, электрохимической устойчивости, а в условиях повышенных температур и агрессивных сред имеют более высокие механические характеристики по сравнению с конструкционными керамическими материалами.

Количество фирм, начиная с 2013 года, занимающихся данной тематикой увеличилось в 1000 раз. Однако, пятерка лидеров (Cree, Dow Corning; 2-6 Company, Mitsubishi и Nordstel) сохранили свои позиции как в области разработок, так и в организации производства новой электроники, постоянно развивая свои технологии. Основной размер получаемых кристаллов этих компаний 3-6" при низкой скорости роста.

Отечественными разработчиками разработана экспериментальная технология ускоренного получения ККК до 6-8". Разработана установка одновременного получения двух-четырех кристаллов размером 4" и установка для последующей сухой абразивной обработки полученных пластин. Разработана методика проведения испытаний оборудования.

В рамках проведенной НИОКР по изготовлению опытных образцов для лазерных излучателей, силовой и СВЧ-электроники перспективного авиационного комплекса отработаны технологии:

- технологии выращивания бездефектных кристаллов карбида кремния с мелко доменной наноструктурой;
- технологии резки и обработки поверхности без нарушенных слоев ККК.

Полученные образцы прошли испытания на режимах, соответствующих режимам эксплуатации и применения перспективного авиационного комплекса. Подтверждена удовлетворительная работоспособность в условиях наложенных в радиоэфире помех, при воздействии электромагнитных волн и СВЧ колебаний, а также иных разрушающих факторов.

## Внедрение и освоение автоматизированных технологий микромонтажа на производстве современных наукоемких РЛС

Филатов С.Е.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Мартинов Г.М.
МГТУ Станкин, Москва
lab421polus@mail.ru

Из-за высокого темпа развития промышленности в современном радиоэлектронном оборудовании все более отчетливо прослеживается тенденция миниатюризации и интеграции ЭРИ, при этом не перестают увеличиваться требования по их функциональности, быстродействии, наработке на отказ, снижения затрат и себестоимости. На основании этого в авиационной и аэрокосмической промышленности стало широко применяться производство гибридных интегральных микросхем, удовлетворяющее всем современным требованиям. Появление новых технологий микромонтажа и корпусирования привело к массовому переходу производства от модулей с безкорпусными монокристаллическими гибридными ИМС к многокристальным модулям на керамическом основании, являющимися одними из самых перспективных типов микросборок на сегодняшний день.

Внедрение и освоение современных технологий производства многокристальных модулей, позволяющих использовать новые методы по монтажу микросборок, имеет ряд достоинств:

1. Снижение массогабаритных показателей;
2. Увеличение срока службы;
3. Высокий уровень повторяемости процесса монтажа;
4. Сохраняемость параметров и характеристик;
5. Высокая скорость монтажа микросборок;
6. Низкие требования к квалификации операторов;
7. Повышение качества сборки;

Практика показала, что помимо положительного эффекта от использования современного автоматизированного оборудования заметно улучшаются электрические параметры микросборок (снижаются паразитные емкости и индуктивности, уменьшается задержка в СВЧ сигналах) благодаря чему повышается надежность в процессе эксплуатации. Из этого можно сделать вывод, что результирующий эффект от внедрения и освоения новых автоматизированных технологий в микроэлектронике, говорит о перспективности и востребованности данной технологии при разработке и производстве современных наукоемких РЛС.

В докладе представлены методические принципы адаптации современного высокотехнологического оборудования под отечественное производство микросборок на примере участка микромонтажа, объекте внедрения автоматизированных технологий. Проведен сравнительный анализ существующих технологических процессов с использованием автоматизированного оборудования. Разработан технологический маршрут и процесс сборки многокристальных модулей. Изложены рационализаторские предложения по сокращению затрат на дополнительную оснастку для оборудования импортного производства. Перечислены варианты переналадки производства под требования единичного

производства многокристальных модулей широкой номенклатурой элементной базы. Исследованы причины возникновения производственного брака.

С целью обеспечения конкурентоспособности выпускаемой продукции в сфере производства РЭА необходимо внедрять в отрасль современных технологий высокотехнологичное автоматизированное оборудование и материалы, а также разрабатывать и совершенствовать рабочие технологические инструкции на уровне стандартов предприятия. Это имеет важнейшее значение при повышении выхода годных изделий, повторяемости процессов, мониторинга производства и повышении качества выпускаемой продукции.

Основными задачами и целями исследования являются:

1. Внедрение высокотехнологического оборудования на участок микромонтажа;
2. Разработка структурной схемы производственных процессов монтажа микросборок;
3. Разработка дополнительной оснастки в целях адаптации работы установок с модулями отечественного производства;
4. Анализ современных технологий в целях создания единого технологического маршрута под требования производства РЛС;
5. Разработка технологических инструкций под каждую единицу оборудования для оптимальной работы операторов в линии;
6. Разработка технологического процесса сборки модулей РЛС с использованием автоматизированных технологий микромонтажа;
7. Исследование причин возникновения производственного брака;
8. Автоматизация технологических процессов на этапе монтажа и сборки, с целью снижения влияния человеческого фактора на работоспособность выпускаемой продукции;
9. Разработка методических принципов повышения качества и надежности микросборок;
10. Расчет показателя такта процесса производства наукоемких РЛС;
11. Анализ результатов повышения эффективности организации производства на базе участка микромонтажа.

Научная новизна данного исследования заключается в разработке технологической архитектуры производственных процессов инновационного автоматизированного участка микромонтажа, удовлетворяющей стандартам современного производства, под выпуск наукоемких изделий с использованием элементной базы отечественного производства в рамках импортозамещения.

## Анализ конструктивно-технологических возможностей производства подшипников скольжения с антифрикционными покрытиями на основе металлополимеров, керамополимеров или композиционных материалов с использованием квазикристаллов

Фокин А.С.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Сильченко О.Б.
МАИ, Москва
alexarhangel2@mail.ru

Целью работы является разработка подшипников скольжения с антифрикционными покрытиями на основе металлополимеров, керамополимеров или композиционных материалов с использованием квазикристаллов.

В работе представлены результаты анализа существующих конструктивных и технологических решений, состояние научно-технического задела и патентные исследования.

Выявлены основные направления по разработке подшипников скольжения с антифрикционными покрытиями на основе металлических, керамических и композиционных матриц с использованием упрочняющих квазикристаллических структур, модифицированных углеродных нанотрубок с использованием нанотехнологии. Определена область применения антифрикционных покрытий и основные технологии для их получения, а также дальнейшие направления исследования.

Проводился Анализ конструктивных решений, используемых при проектировании высоконагруженных подшипников скольжения с жидкостной смазкой. Для анализа использовались гидродинамическая (жидкостная), смешанная (полужидкостная) и граничная смазки

Для подбора пар трения и смазочных материалов и выявления их служебных свойств для реального узла трения использовали рациональный цикл триботехнических испытаний (РЦИ). Испытания осуществлялись как на образцах, так и на натурном объекте.

Этап 1. Подбор пары трения на основании априорной информации по критериям совместимости. Выявление границ совмести пары трения по определенному параметру при комнатной, повышенной и отрицательной температурах окружающей среды при испытаниях на лабораторной установке.

Этап 2. Моделирование на образцах пары трения при комнатной, повышенной и отрицательной температурах окружающей среды.

Этап 3. Натурное моделирование на стенде эксплуатационных условий работы пары трения в узле машины.

Натурное моделирование экстремальных условий на стенде.

Этап 4. Натурное моделирование в типовых условиях эксплуатации узла машины.

Триботехнические испытания проводили при тяжелых условиях трения скольжения: при высоких начальных нагрузках, при применении в качестве смазки маловязкой углеводородной жидкости - керосина.

Трение осуществлялось между валом (роликом) из закаленной стали ШХ-15 диаметром 40 мм и образцом антифрикционного материала шириной 6 мм, погруженным в ванну с керосином. Нагрузка, прикладываемая с помощью пружинного устройства, во всех испытаниях была равна 20 кгс, скорость скольжения - 0,5 м/с., длительность большинства испытаний составляла 120 мин. Каждые 5 (10 минут производились замеры коэффициента трения. В конце каждых испытаний определялись значения удельной нагрузки р и соответствующие значения произведения удельной нагрузки на скорость скольжения pV.

Кроме триботехнических испытаний металлофторопластового материала была проведена оценка прочности соединения антифрикционного слоя (пористой бронзы) со стальной основой.

Выполненные исследования позволяют рекомендовать в качестве матриц новых многофункциональных КМ алюминиевые сплавы. Эти сплавы широко применяют для изготовления «традиционных» КМ, армированных тугоплавкими высокомодульными частицами или волокнами.

В качестве экзогенной армирующей фазы опробованы наноразмерные высокомодульные наполнители (A1203 и SiO2), а в качестве эндогенных упрочнителей - интерметаллические соединения TiAl3 и TiAl.

Предварительная обработка армирующих наполнителей заключалась в прокаливании при температуре 600-650°С в течение 1,5-2 часов с целью удаления адсорбированных примесей с поверхности частиц и их активации. Порошки титана и никеля просушивали в сушильном шкафу при температуре 150-170 °С в течение 50-60 минут.

При отработке технологии компактирования исходных компонентов в брикеты для проведения синтеза КМ установлено, что для осуществления экзотермической реакции при введении брикетов в расплав необходимо обеспечить оптимальную их плотность и пористость.

Экспериментально установлено, что для осуществления экзотермической реакции плотность брикетов на основе титанового порошка должна составлять 3,0-3,2 г/см3. При этом значении плотности пористость брикетов составляет 30-35 %.

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы:

Наибольший интерес с точки зрения применения в качестве антифрикционных покрытий из металлополимеров вызывают металлофторопластовые материалы с пропиткой дисульфида молибдена (MoS2). Среди керамополимеров наиболее перспективны материалы из оксида алюминия (Al2O3), карбида кремния (SiC), нитрида кремния (Si3N4) и карбонитрида титана (TiCN). Использование квазикристаллов для модификации антифрикционных покрытий еще не достаточно проработано, но имеет большой потенциал применения.

## Анализ сопряжений с твёрдосмазочными покрытиями летательных аппаратов, функционирующих в условиях космоса

Фоченков А.И.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Хопин П.Н.
МАИ, Москва
andrei-fochenkov@mail.ru

Спутники и космические системы имеют ряд подвижных механических частей, чья надежность сильно ограничена деградацией смазочных материалов и чрезмерного износа. Многие системы могут оставаться в космосе в течение 10-30 лет, и, следовательно, подвергается воздействию атомарного кислорода, солнечного излучения, энергичных частиц и циклического изменения температуры от криогенных до 400оС. Кроме того, эти системы часто проходят испытания на земле и хранятся в течение многих лет в контролируемых условиях перед запуском. Кроме того, многоразовые ракеты-носители планируется таким образом, чтобы они могли работать с пространственно-наземным циклом и температурными пиками, которые превышают 800°C во время повторного входа [1,3].

Цель работы – анализ современных исследований сопряжений с твёрдосмазочными покрытиями для летательных аппаратов, функционирующих в условиях космоса.

Для подобных узлов было разработано твёрдосмазочные покрытие (ТСП) «хамелеон», которое, изменяя его поверхностную (как химию, так и структуру), самостоятельно приспосабливается к окружающей среде и, таким образом, достигает долгого срока службы. Первый вид ТСП типа «хамелеон» был изготовлен с использованием WC, WS2 и алмазоподобного углерода (DLC); при условии, что они обладают превосходной механической прочностью и производительностью в космосе и в наземной окружающей среде. Для того чтобы решить вопрос работоспособности при изменении температуры, второе поколение покрытия «хамелеона» были сделаны из стабилизированного оксидом иттрия циркония (YSZ) в золотой матрице с инкапсулированными наноразмерными резервуарами MoS2 и DLC.

Сделано восемь трибометров MISSE 7 на диске для тестирования материалов в космосе на борту Международной космической станции [2]. Они подвергались прямому воздействию земной орбиты (LEO) на борту Международной космической станции «платформа «Эксперименты» и испытывали экстремальные условия, включая воздействие атомного кислорода, сверхвысокого вакуума, излучения (включая УФ радиацию) в температурном диапазоне от -40 до 60°C. Эти трибометры были спроектированы так, чтобы быть чрезвычайно компактными, прочными и надежными. Выполнялись эксперименты трибологии по схеме «Pin-on-Disk» со скоростью скольжения 13,2 мм / с (14 об / мин при 9 мм радиус износа) и 1 N нормальной нагрузке с полусферическим штифтом с радиусом 1,5875 мм. Проверенные материалы включают MoS2 / Sb2O3 / Au, MoS2 / Sb2O3 / C, YSZ /

Au / MoS2 / DLC и SiO-легированных покрытий DLC, а также объемные образцы политетрафторэтиленовые (ПТФЭ), нанокомпозиты оксида алюминия и золото.

Литература

1. Voevodin A.A., Zabinski J.S. Nanocomposite and nanostructured tribological materials for space applications. Composites Science and Technology 65 (2005) 741–748

2. Brandon A. Krick, Gregory W. Sawyer Space Tribometers: Design for Exposed Experiments on Orbit. Tribol Lett (2011) 41:303–311

3. Хопин П.Н. Оценка работоспособности пар трения с твердосмазочными покрытиями в условиях вакуума. // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2016. № 2 (32). С. 85-90.

## Разработка технологии создания выходного устройства с низким уровнем шума из высокотемпературных металлокерамоматричных композиционных материалов (ВМКМ)

Хамзатханов С.С.

Научный руководитель — д.т.н. Сильченко О.Б.

МАИ, Москва

ww.salam.ww@mail.ru

- Анализ состояния за рубежом и Российской Федерации позволяет сделать вывод, что наиболее перспективные для решения задач снижения уровня шума реактивных сопел являются получаемые различными способами высокопористые материалы, в которых поры разделены перегородками равномерной толщины. В этом состоит их принципиальное отличие от других типов пористых материалов, например, ячеистого строения или спеченных порошков, у которых межпоровые перемычки неравномерны и имеют характерные сужения с повышенным термическим и гидро-газодинамическим сопротивлением. Вследствие этого легковесные высокотемпературные пористые композиционные материалы (ЛВПКМ) имеют более высокие физико-механические и акустические параметры, благодаря которым становится возможным изготовление конструкционных пеноматериалов с высокой пористостью (95-98%).
- Поперек сечения шумоизлучающей трубы: ЛПВКМ на предварительных испытаниях образцов материала показал высокие возможности ослабления шума, когда акустические волны, распространяются перпендикулярно плоскости материала, при этом было достигнуто снижение уровня шума от 45 дБ / м при 250 Гц до 68 дБ / м при 1000 Гц. Поскольку ЛПВКМ создает в потоке минимальный перепад давления, он может быть использован в конструкциях, где допустимо некоторое замедление и гомогенизация потока, в том числе в глушителях поршневых и роторных двигателей легкомоторной авиации.
- На стенках шумоизлучающей трубы для условий, в которых даже низкий перепад давления, создаваемый ЛПВКМ, не является критическим, композит может быть использован по длине трубопровода - сопла. В таком виде слой ЛПВКМ толщиной 2,5 сантиметра с защитным износостойким покрытием позволяет сократить уровень шума на 19 дБ/м при 250 Гц до 41Дб/м при 1000 Гц. Поскольку композиционный материал ЛПВКМ не теряет прочности до 1650 °С, он может быть использован в экстремальных условиях эксплуатации в реактивном двигателе.
- Эффективность работы ЛПВКМ в составе сопла ГТД существенно зависит от конструктивного исполнения. Для повышения эффективности звукопоглощения необходимо иметь максимально возможную площадь для шумопоглощающих ЛПВКМ, равномерно распределенную по поперечному сечению сопла ГТД, обеспечив при этом минимальные аэродинамические потери и минимальные весо-габаритные параметры.
- Вывод: Наиболее перспективным решением представляется облицовка шумопоглощающими ЛПВКМ наружних и внутренних контуров сопла и стоек на выходе из

первого и второго контуров ГТД. Данное решение позволит наиболее эффективно и в широком диапазоне частот поглощать звуковой поток по всему сечению сопла ГТД.

## Оценка эргономичности универсального горизонтального стенда для испытаний ракетно-космической техники

Хван А.Г.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Найченко М.В.
МАИ, Москва
don.hwan@yandex.ru

Стенд состоит из двух боксов и пяти отсеков из которых три кислородные и два водородные. Каждый отсек оснащен шестью емкостями.

Проведение работ на данном стенде требует удобства и безопасности выполнения операторами запланированных процедур согласно методикам испытаний. Удобство и безопасность работ на стенде в немалой степени обеспечивается его эргономичностью.

Для оценки эргономичности стенда была разработана специальная методика. С ее помощью можно получить однозначную количественную оценку любого эргономического свойства и стенда в целом.

В качестве критерия оценки эргономичности стенда используется относительный показатель, определяющий степень соответствия оцениваемого эргономического свойства (стенда) предъявляемым эргономическим требованиям и названный показателем эргономичности (для простых свойств – показателем качества). Показатель эргономичности (коэффициент качества) изменяется от нуля до единицы.

Для оценки эргономичности используется квалиметрический метод, при котором коэффициенты качества простых, сложных и комплексных эргономических свойств определяются расчетным путем, а коэффициенты весомости свойств и индивидуальные коэффициенты качества простых (качественных) эргономических свойств – экспертным (методом экспертного опроса).

Последовательность оценки эргономичности стенда включает в себя:

- построение дерева эргономических свойств;
- определение коэффициентов весомости (важности) эргономических свойств;
- определение базовых, экстремальных и реальных эргономических показателей;
- определение показателей эргономичности (коэффициентов качества) простых, сложных, комплексных свойств и стенда в целом.

При анализе результатов оценки эргономичности определяются свойства, у которых при высоком групповом нормированном коэффициенте весомости показатель эргономичности стремится к нулю, то есть «слабые» свойства, снижающие уровень эргономичности стенда.

Выработку предложений по улучшению эргономичности стенда целесообразно проводить в такой последовательности:

- определить свойства, которые требуют улучшения. Это прежде всего простые эргономические свойства с низким коэффициентом качества;
- разработать мероприятия (компоновочные, конструктивные, организационные и т. п.) по улучшению этих свойств.

# Ультразвуковая ударная обработка крупногабаритных металлоконструкций

Цыкин А.Е.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Садковский Б.П.
МАИ, Москва
a.tzuikin@ya.ru

Крупногабаритные металлоконструкции широкой номенклатуры и разнообразных конструктивных форм применяются в различных отраслях промышленности, в том числе радиоэлектронной. Современные радиолокационные системы (далее – РЛС) представляют собой сложные информационно-управляющие системы реального масштаба времени и имеют важное значение в гражданской авиации, сельском и лесном хозяйстве, а также в метеорологии. Неотъемлемой частью РЛС являются металлоконструкции, изготовленные с применением сварки, клепки, механической обработки. В процессе изготовления отдельные составные части металлоконструкций, такие как балки, швеллера, уголки, листы и пр. подвергаются как местному нагреву, так и пластической деформации, что приводит к возникновению остаточных напряжений, влияющих на стабильность размеров в последующих производственных процессах или вызывающих возникновение усталостных трещин и склонность к коррозионному растрескиванию во время эксплуатации.

В современной промышленности используются следующие способы снятия остаточных напряжений и деформаций:

- термический: общий нагрев, когда равномерно нагревают все изделие, или местный нагрев, когда нагревают только часть конструкции;
- механический: проковка, прокатка, вибрационная обработка, обработка взрывом, ультразвуковая ударная обработка и другие способы.

Несомненно, следует выделить ударную ультразвуковую обработку как метод, реально позволяющий повысить качество, надежность и ресурс сварных конструкций.

Для выполнения ударной ультразвуковой обработки возможно использовать технологический комплекс "Шмель-1", который методом поверхностного пластического деформирования материала на ультразвуковой частоте оказывает комплексное воздействие на сварное соединение:

- снижает концентрацию напряжений нагрузки в сварном соединении;
- создает на обрабатываемой поверхности упрочняющий слой с повышенной сопротивляемостью к образованию трещин;
- выгодно перераспределяет остаточные сварочные напряжения в сварном шве и околошовной зоне;
- повышает циклическую долговечность сварного соединения до уровня основного металла.

Ультразвуковая ударная обработка является методом послесварочной обработки, который создает комплексный технологический эффект повышения качества и надежности конструкций. В тоже время, технологические и ресурсные характеристики позволяют широко использовать этот метод, как в производстве, так и в ремонте сварных металлоконструкций.

# Разработка методического и программного обеспечения математического моделирования функциональных узлов современных РЛС на базе аддитивных технологий

Черевиченко А.В., Аликина А.С.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Гвоздарев Р.С.
МАИ, Москва
aliseparadise@yandex.ru

В настоящее время мир стоит на пороге четвертой промышленной рево-люции, «Индустрия 4.0» со временем приведёт к полной автоматизации большинства процессов производства. Появление новых требований к тактико-техническим характеристикам радиолокационных комплексов (РЛК) приводит к необходимости изменения требований к радиолокационным станциям (РЛС) входящим в их состав. Как правило, к РЛС предъявляются традиционные требования к: мобильности, массогабаритным характеристикам, энергопотреблению, стоимости и т.д.

В последнее время на стадии опытно-конструкторской разработки (ОКР) радиолокационной аппаратуры специалисты отказываются от этапа макетиро-вания основных функциональных узлов изделия, в связи с тем, что это вносит дополнительную трудоёмкость и тем самым резко увеличивает временные рамки выхода нового изделия на конкурентный рынок, но наряду с этим, при отсутствии этапа макетирования принципиальные конструкторско-технологические решения проверяются на стадии испытаний по результатам ОКР, что влечёт за собой высокую трудоёмкость по корректировке документа-ции и доработке опытных образцов в случае ошибочно принятых решений.

Одним из оптимальных решений этой задачи является внедрение адди-тивных технологий на этапе ОКР современных РЛС. В отличие от традиционного производства, при использовании аддитивных технологий есть возможность оптимизировать временные издержки за счёт снижения количества технологических процессов.

Использование аддитивных технологий при разработке и производстве современных наукоёмких РЛС находится на ранней стадии внедрения, в связи, с чем методики и программное обеспечение недостаточно отработаны и не раскрывают всех производственных возможностей.

В свете этого разработка методического и программного обеспечения ОКР современных РЛС на базе аддитивных технологий является актуальной задачей, позволяющей добиться высоких тактико-технических характеристик изделий.

Список использованной литературы:

1. Гвоздарев Р.С. "О методических подходах к использованию конструкторских за-делов для обеспечения качества разработок в условиях совре-менного производства", Сборник материалов Одиннадцатой Все-российской научно-практической конференции «Управление качеством» 10-11 марта Москва – 2012, стр. 78-79.

2. Гвоздарев Р.С., Глудкина М.С., Разбаш Р.В "Методические принципы повышения качества планирования опытно конструкторских работ при разработке радиолокационных станций", Сборник научных трудов «XLIII Международной молодежной научной конференции Гагаринские чтения» том 1. Москва – 2017, стр. 602-603

3. Федоров В.К., Гвоздарев Р.С., Архипцев С.А. Корректировка конструкторской документации как фактор риска возникновения незавершенного производства, Экономика и управление в машиностроении, №5 2013г., стр. 13-22.

# Разработка программного обеспечения для размерного анализа механообработки в среде Autodesk Inventor

Четверикова А.В.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Калачев О.Н.
ЯГТУ, Ярославль
nastyapetrelli13@gmail.com

Размерный анализ технологических процессов – это совокупность большого числа сложных и трудоемких расчетно-аналитических процедур, необходимых при проектировании и анализе технологических процессов механической обработки. Одной из главных задач размерного анализа технологических процессов (ТП) является правильное и обоснованное определение промежуточных и окончательных технологических размеров и допусков на них для обрабатываемой детали. Снижение трудоемкости размерного анализа возможно при его автоматизации. На современном производстве первоначально создается 3D-модель детали, а от неё получаются чертежи, конструкторская и технологическая документация. Различные методики размерного анализа представлены в работе [2].

Работа посвящена созданию программы для выполнения размерного анализа непосредственно на экранной 3D-модели. Ранее в нашем ВУЗе был подготовлен вариант такой программы [1].

Нами ставится задача разработать программное решение, позволяющую анализировать геометрию 3D-модели и выполнять размерное моделирование обработки в среде Autodesk Inventor. Создание такой программы предполагает исследование геометрии модели программными средствами анализа ее геометрической базы данных, способов программного построения дополнительных примитивов, характеризующих промежуточные состояния заготовки.

Прикладное программное обеспечение создается для среды Autodesk Inventor на языке Visual Basic for Applications. От алгоритмов бумажных построений необходимо перейти к анализу возможностей с одной стороны языка, а с другой – объектной модели, т.е. описания геометрии средствами этого языка.

Разработанный алгоритм предусматривает знание объектной модели геометрического объекта в CAD-системе, её исследование первоначально проведено на простейших примерах средствами языка VBA, его особенностей, основных функций. Далее использовалась среда программирования MS Visual Studio и язык VB.NET для разработки интерфейса будущего приложения, который подключается к выполняемому процессу в Inventor. Ранее проверенные решения на языке AutoLISP программы GraKON (программа для построения в среде AutoCAD размерных цепей в 2D) помогли реализовать некоторые блоки новой программы, например – автоматическое определение границ конструкторских размеров.

Даются пояснения программного кода и примеров различных стадий процесса проектирования

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Программная модификация геометрии 3D-модели детали в Autodesk Inventor для построения графа изменения размеров заготовки при механообработке / Калачев. О.Н., Булычев Ю.В., ЯГТУ;

2. Методы автоматизации размерного анализа технологических процессов в России Масягин В.Б., Мухолзоев А.В., Шаимова С.Б.; Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2015 г.

# Оценка физико-механических свойств поверхностного слоя по диаграмме вдавливания сферического индентора

Шандрук В.С.
Научный руководитель — Грачев М.В.
МАИ, Москва
prizrakvov@yandex.ru

Современные тенденции в развитии материаловедения и технологий по модифицированию поверхностных слоев направлены на получение заданных физико-механических параметров с учетом условий эксплуатации деталей. Особую значимость это приобретает, в частности, в современном авиа – двигателестроении. Где задачи обеспечения износостойкости, усталостной прочности, фреттингостойкости, коррозионной стойкости и т.п. являются актуальными.

Правильное решение поставленных задач должно быть основано не только на верном и обоснованном выборе режимов и методов технологического воздействия, таких как нанесение покрытий, химико-термическая обработка и другие, но и в возможностях достоверной оценки и прогнозирования такого воздействия на объект.

Традиционными методами определения механических свойств материалов являются испытания на растяжение, сжатие, оценка твердости и микротвердости. Определенный интерес представляет метод, основанный на непрерывной регистрации нагрузки и глубины внедрения индентора в испытуемый образец.

Для записи диаграммы вдавливания сферического индентора применяется специальная установка.

Она позволяет вдавливать индентор и перемещать образец в тангенциальном направлении с непрерывной регистрацией силы вдавливания от 0 до 800 Н, глубины внедрения, силы трения и величины смещения в тангенциальном направлении.

Установка включает в себя три основных кинематических узла : механизм нагружения, механизм опускания и подъема индентора, механизм тангенциального перемещения.

Установка работает следующим образом. Образец из исследуемого материала закрепляется на столе. Каретка перемещается вертикально и, при достижении необходимой силы касания, происходит останов каретки и ее фиксация электромагнитами.

Для исключения погрешности измерений из-за податливости в стыке «образец-стол» индуктивный преобразователь жестко крепился на штоке, а индентор, в качестве которого служили выглаживатели со сферической рабочей частью из природных и синтетических алмазов, соединен со штоком посредством резьбового соединения.

Образцы изготавливались в виде пластин толщиною не менее 8 мм, что давало основания рассматривать их как упруго-пластическое полупространство. После нагружения осуществлялась выдержка в течение 10... 15 секунд, затем производилась разгрузка. В каждом случае выполнялось не менее 3-х опытов с последующим осреднением результатов. Для исключения взаимного влияния соседних отпечатков они располагались на расстоянии, превышающим их диаметр в 5 раз. Результаты тарировки обрабатывались по методу наименьших квадратов.

Величину контактных давлений целесообразно рассматривать в зависимости от степени деформации в отпечатке, которая, в отличие от конуса и пирамиды, при вдавливании сферического индентора перемена из-за нарушения геометрического подобия лунки. Кроме того, степень деформации для сравнительной оценки удобна тем, что она безразмерна.

1. Ковалев А.П. Закономерности вдавливания сферического индентора и оценка физико-механических свойств поверхностного слоя деталей// Упрочняющие технологии и покрытия. - 2007. - №1. - С. 36-42.

2. Грачев М.В. Оценка физико-механических свойств поверхностного слоя по диаграмме вдавливания сферического индентора для титанового сплава ВТ3-1// Международный научно-исследовательский журнал. - 2017. - №5. - С.36-39.

## Автоматизация процедур управления качеством в производстве изделий аэрокосмиеской техники

Шахривар С.М.
Научный руководитель — Курицына В.В.
МАИ, Москва
saxar.shahrivar@yahoo.com

Многообразие целей и задач, стоящих перед технологическим менеджментом производственной организации, сложность проблем, динамичные и нечеткие условия требуют регулярного принятия различных управленческих решений в таких областях как: конструкторско-технологическая доводка изделий производства; модернизация и технологическое перевооружение производства; выбор направления технологических инвестиций и многие другие [1]. Единая технологическая политика консолидации компетенций и инновационной модернизации предприятий наукоемких отраслей промышленности требует привлечения широкого спектра инструментов стратегического анализа, научно-технической экспертизы, технологического менеджмента качества производств.

Особое место в системе контроля качества занимают статисти¬ческие методы контроля, которые находят широкое применение, как в приемочном, так и в текущем контроле (Statistical Quality Control - SQC). Типовые семь статистических методов анализа и управления качеством включают: 1) причинно-следственные диаграммы (диаграммы Ишикавы); 2) анализ Парето (ABC-анализ); 3) стратификация (расслоение); 4) гистограммы; 5) диаграммы разброса; 6) технологические контрольные карты; 7) контрольные листки. Для повышения оперативности контроля необходимо учитывать минимальное число важнейших параметров. В то же время совокупность выбранных параметров (или один обобщенный параметр) должна определять качество изделия. Причем обязательно должны быть представлены все критичес¬кие параметры изделия, выход каждого из которых за определенные допустимые пределы следует исключить.

Для автоматизации процедур проведения статистического контроля качества для различных его форм и методов предлагается применение программной среды визуального графического программирования и MatLAB с соответствующей разработкой диалогового интерфейса. Иерархическая модель технологической системы прогнозирования и оценки функционирования, реализованная в среде визуального моделирования MatLAB Simulink, позволяет оптимизировать, повысить эффективность и надежность технологического обеспечения параметров качества изготовления высокотехнологичных изделий.

Матричная система представления данных среды MatLAB позволяет реализовать не только типовые методы анализа качества технологических систем, но и прогрессивные методы анализа, получившие название «Семь новых методов контроля качества»: 1) диаграммы сродства; 2) граф связей; 3) иерархические структуры и «деревья» решений; 4) матричное представление данных; 5) стрелочная диаграмма; 6) блок-схема процессов принятия решений; 7) матрицы приоритетов.

Современные информационные технологии обеспечивают возможность для моделирования процессов, оперативного анализа, подготовки и представления результатов для последующего принятия решений. Таким образом, обеспечивается возможность научного обоснования бизнес-планов технологического оснащения, переоснащения и

модернизации наукоемкого производства сложной продукции аэрокосмической отрасли, разработке стратегий развития [2, 3].

Наиболее полно анализ систем обеспечения качества решается методами моделирования процессов как производственных, так и управленческих инструментами математической статистики. При развертывании систем менеджмента качества эффективным является сочетание как типовых технологий анализа, так и специализированных технологий оценки, учитывающих особенности производственной отрасли, наукоемкость выпускаемой продукции. Основная задача применения таких технологий анализа – в полной мере выполнять функцию доказательств качества как с точки зрения производителя, так и с позиций заказчика продукции.

## Высокотехнологичные блоки с универсальными радиопоглощающими свойствами

Шикалов В.Н.
Научный руководитель — Кравцов С.Б.
МАИ, Москва
vladshikalov@mail.ru

В последние годы средства радиолокационного обнаружения, так же как и средства радиоэлектронной борьбы, используя новейшие технологии, совершили во всех развитых странах технологический рывок в создании новых вооружений и средств защиты от них. В том числе постоянно совершенствующиеся методы защиты от радиолокационного обнаружения. Для стационарных объектов защита от радиолокационного обнаружения не столь актуальна, так как скрыть место расположения крупного стационарного объекта – почти не выполнимая задача. Но этот вопрос является весьма актуальным для движущихся объектов – самолетов, морских судов и наземных мобильных установок. В этом случае применяются специальные защитные покрытия или материалы, имеющие низкие МГП и высокие показатели радиопоглощения.

Необходимо отметить, что значительного поглощения радиоволн можно добиться только в сантиметровом и миллиметровом диапазоне(до 50 дБ), и гораздо хуже в дециметровом и метровом(10-17дБ). Анализируя законы распространения, отражения и поглощения радиоволн, можно утверждать, что сделать объект малозаметным в метровом диапазоне радиоволн задача трудноразрешимая и добиться высоких показателей поглощения метровых радиоволн очень сложно. Также почти невозможно добиться полного поглощения любого радиоизлучения, падающего на объект под произвольным углом.

Присутствие изоморфных примесей как в радиопрозрачных, так и в радиопоглощающих материалах оказывает значительное влияние на процесс пропускания, поглощения и отражения электромагнитных волн

Тщательный анализ уже разработанных материалов на основе пеностекла позволяет сделать вывод, что для расширения частотного диапазона радиопоглощающих свойств пеностекла необходим композитный материал, состоящий из нескольких слоев, каждый из которых будет обладать своими радиопоглощающими свойствами в определенном частотном диапазоне. При этом слои в композитном материале должны располагаться в определенной последовательности. Первый слой должен обеспечивать радиопрозрачность в дм и см диапазоне частот при высокой поглощающей способности радиоволн в мм диапазоне. Следующий слой должен обладать максимальной способностью поглощения (или максимально отражать) дм и см диапазон частот. В этом слое один материал должен иметь возможность замены на другой в зависимости от конкретного предназначения. И третий слой должен по возможности обладать свойствами радиопоглощения в широком диапазоне частот.

Как уже было сказано выше, радиопоглощающие свойства зависят от химического состава и структуры (в нашем случае от размера пор вспененного стекла).

Тонкодисперсное измельчение компонентов пенообразующей смеси позволяет получать стеклокомпозит с мелкопористой структурой, а вспенивающая способность зависит от дисперсности компонентов и температуры вспенивания. Для повышения долговечности и снижения затрат при монтаже на конструкцию стеклокомпозит имеет плазмохимическое покрытие по лицевой поверхности. Ниже приведена

Композитный материал на основе пеностекла может быть использован как в условиях мороза на территории вечной мерзлоты, куда рабочая техника не способна добраться, так и в условиях палящей пустыни, где он так же сможет исполнять роль составной части навеса для защиты от солнца техники и электроники в целом. Высокая технологичность пеностекла позволяет изготавливать из него различного вида блоки и крепить их к несущей конструкции при помощи винтового соединения, замков, а так же к несущим поверхностям – при помощи клея и любого другого крепежа. Предполагается, что конечное изделие будет выглядеть как пустотелый короб размерами 600х600мм по ширине и длине при высоте 120 – 200мм. Короб будет представлять собой конструкцию из трёх слоёв. Расчетный вес такого блока будет составлять до 6кг. Такие блоки могут устанавливаться вручную, что особенно важно в местах с тяжелыми климатическими условиями. Малый удельный вес позволяет использовать указанные блоки в труднодоступных местах.

В своей работе мы постарались учесть все достоинства и недостатки пеностекла и предлагаем конструкцию строительного блока с учетом изменений, которые позволяют значительно расширить частотный диапазон радиопоглощающих свойств при сохранении высоких показателей термозащитных свойств.

Для достижения поставленной нами цели, изделие будет изготавливаться из нескольких слоев с различными радиофизическими свойствами. Нижний и верхний слои блока необходимо выполнить из вспененного стекла с различными радиофизическими показателями (диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, коэффициент линейного расширения) и различными размерами пор, от которых напрямую зависит длина поглощаемых волн.

Как результат получается высокотехнологичный элемент, область применения которого включает защиту от электромагнитного излучения, используемого при радиоэлектронной борьбе, оснащение многофункциональных экранированных помещений, маскировку средств вооружения и военной техники от обнаружения радиолокационными средствами противника.

## Анализ возможностей применения технологий топологической оптимизации на производственно-технологическом этапе жизненного цикла изделия

Якурнова К.А., Алендарь А.Д.
МАИ, Москва
yakurnova.ksushnya@yandex.ru

Анализ возможностей применения технологий топологической оптимизации на производственно-технологическом этапе жизненного цикла изделия.

Методы оптимизации силовых конструкций играют важную роль при проведении проектировочных исследований авиационных конструкций, позволяют определять рациональное распределение материала с учетом многочисленных функциональных ограничений. Топологическая оптимизация позволяет с помощью решения дифференциальных и интегральных уравнений снижать массу и повышать жесткостные и прочностные характеристики конструкций, создавать новые границы тела и редактировать существующие.

Инженеры-разработчики ставят определенные задачи для эффективного поиска оптимальной конструктивно-силовой схемы: получить максимальную производительность при заданной себестоимости, или наоборот, получить минимальную себестоимость при заданной производительности. В первом случае критерий оптимизации – производительность, а во втором – себестоимость. Такое моделирование позволяет уменьшить массу изделия, и, следовательно, сократить издержки на производство. Уменьшение массы изделия при сохранении расчетных характеристик изделия – важнейшая задача в самолетостроении, аэрокосмической отрасли и автомобилестроении.

Алгоритм оптимизации топологий силовой конструкции требует значительных временных затрат и больших вычислительных ресурсов. Условно можно выделить следующие этапы:

1) загрузка геометрической модели изделия. Отмечаются зоны, которые не подлежат изменению. Все остальное, что не попало в эти зоны, но принадлежит детали, является так называемой «design space», то есть той зоной, где программа может менять геометрию изделия;

2) задание силовой схемы нагрузок;

3) создание новой оптимизированной геометрии.

Между заданными неизменными местами (например, для крепления) выстраивается новая модель. При этом производится комплекс прочностных расчетов. Если сечение не выдерживает нагрузки, то сечение подвергается изменению. Этот метод моделирования называется методом конечных элементов. Для каждой точки изделия программа составляет и решает интегральные уравнения, учитывая при этом взаимосвязи между всеми точками. В результате расчета получается новая геометрия детали. В итоге конструктор, проведя при желании какие-либо изменения, получает CAD-модель. Затем, после верификации в других программных продуктах геометрия утверждается, оптимизируется под необходимый вид обработки (литье, штамповка, ковка и т.д.) и передается в производство.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что перспективы использования топологии оптимизации в промышленности значительно зависят от квалификации конструкторов. При этом они должны обладать комплексом определенных компетенций в области современных методов механики и прикладной математики. Кроме того, сложная геометрия деталей, получаемая после оптимизации, часто очень сложна и требует использования аддитивных технологий изготовления. Поэтому необходимо увеличить темпы их внедрения на производственные предприятия.

## Разработка комплексной методики объединения информации при оценке точностных характеристик ЛА

Агафонов М.В., Кабешов М.А.
Научный руководитель — Кириллин А.В.
МАИ, Москва
maxx-001@mail.ru

Разработка математических моделей сложных технических систем и прогнозирование их технических характеристик в процессе дальнейшего их функционирования лежат в основе успешного проектирования новых изделий и надежной эксплуатации существующих [1].

Целью работы является создание комплексной методики объединения информации при оценке точностных характеристик ЛА.

В ходе выполнения работы были проанализированы общие сведения об испытаниях с использованием разных моделей, рассмотрен поэтапно процесс моделирования. Исследовались принципы и способы модификаций математических моделей объектов испытаний, а также протекающих в них процессов.

В работе были сформулированы методы описания и аппроксимации математических моделей параметров летательного аппарата. В качестве примера объекта испытаний взята ракета–носитель Вега Европейского Космического Агентства. Так же дано подробное описание характеристик ракеты, описание типового полетного задания и миссии ракеты–носителя в целом. Дано краткое описание способов аппроксимации и с обоснованием выбора одного из них в качестве основного метода, применяемого в работе.

Произведен выбор исследуемой точностной характеристики из перечня параметров ракеты–носителя. Произведена аппроксимация данных, полученных при летных испытаниях ракеты–носителя, кубическим сплайном. Выбрана частота дискретизации временного параметра полетного задания для дальнейшего проведения статистических испытаний. Определены контрольные точки моделирования, параметры в которых были реализованы с использованием метода Монте–Карло. На основе этих данных были построены эмпирические и модельные зависимости и определенны их статистические и вероятностные характеристики.

По результатам анализа была сформулирована методика объединения информации, полученной на этапе математического статистического моделирования с информацией, полученной на этапе летных испытаний. Объединение информации производилось с помощью байесовского подхода к оцениванию, приведенного в [2], позволяющего учесть априорную информацию, полученную в процессе проектной деятельности, с апостериорной, получаемой на этапе наземных и летных испытаний. Разработанные алгоритмы и методики формализованы на специализированном языке программирования R.

Результатом работы является подтверждение адекватности методики объединения информации при оценке точностных характеристик летательного аппарата. Также была подтверждена адекватность кубических сплайнов в качестве аппроксимационной модели выбранной точностной характеристики, полученной по результатам летных испытаний.

Список использованной литературы

1. Александровская Л.Н., Кириллин А.В. Системный подход в обеспечении качества испытаний изделий авиакосмической техники. – М.:Изд-во МАИ, 2017. – 160 с.:ил.

2. Александровская Л.Н., Кириллин А.В. Обобщение байесовского подхода в задачах объединения разнородной информации процесса экспериментальной отработки сложных технических систем. // В сборнике: Управление качеством Избранные научные труды Пятнадцатой Международной научно-практической конференции. 2016. С. 47-51.

# Расстановка приоритетов перевода технологической документации в электронный вид

Беличенко С.С.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Юрин В.Н.
МАИ, Москва
stasonete@gmail.com

Конкурентоспособность промышленности в настоящее время во многом определяется системным использованием информационных технологий на всех стадиях жизненного цикла изделий [1], [2]. Актуальность этой тематики подтверждается принятием Стратегии научно-практической развития Российской Федерации (2016 г.), Программы цифровой экономики Российской Федерации (2017 г.).

С целью повышения производительности труда при технологической подготовке производства (ТПП), путем сокращения времени на создание необходимого при производстве комплекта документов, требуется осуществить перевод технологических документов в электронный вид, а также обеспечить на протяжении всего жизненного цикла изделия (ЖЦИ) системное использование информационных технологий для необходимого информационного взаимодействия участников ТПП. [1]

ТПП заключается в проектировании технологического процесса изготовления изделия и средств технологического оснащения (СТО) с созданием технологической документации (ТД) и конструкторской документации (КД) СТО. ТД – графические и текстовые документы, которые определяют технологический процесс изготовления изделия. Основными документами ТПП по ГОСТ 3.1102 являются: маршрутная карта (МК), операционная карта (ОК), карта наладки (КН), карта технологической информации (КТИ), а также управляющая программа (УП) для оборудования с ЧПУ и различные ведомости. При проектировании и изготовлении СТО первоначальным документом является бланк заказа (БЗ) СТО, затем создаются необходимые документы для изготовления СТО (КД и ТД). Состав документов СТО аналогичен КД и ТД изделия.

Для расстановки приоритетов использован метод, предложенный В.А. Блюмбером и В.Ф. Глущенко [3]. В ходе данной работы в роли объектов сравнения выступают виды ТД изготовления изделия, КД СТО и ТД СТО, а критерием оценки – объем использования КД изделия при формировании вышеуказанных документов. Для сравнения объектов строится квадратная матрица смежности, ячейки заполняются математическими знаками >, =, < в соответствии с предпочтительностью вариантов, затем знаки заменяют коэффициентами предпочтительности aj (1,5; 1; 0,5 соответственно) и вычисляется сумма □ai,j по строкам матрицы каждого объекта. Следующим шагом является определение абсолютного приоритета Рабс,i и значимости βi объектов исследования. Для расчета Рабс,i каждая строка матрицы умножается на вектор-столбец (суммы □ai,j). Значимость βi является относительным приоритетом объекта. В результате расчета имеем: βМК=0,120; βОК=0,153; βКН=0,106; βКТИ=0,093; βУП=0,172; βВедомости=0,072; βБЗ СТО=0,082; βТД СТО=0,136;

β КД СТО=0,064.

В связи с большим объемом рассматриваемых документов необходимо отобрать виды ТД изделия, КД СТО и ТД СТО, при формировании которых в наибольшей степени используется информация КД изделия. Для определения группы приоритетных документов строилась диаграмма Парето [4], с помощью которой по ранжированной значимости указанных видов документов в соответствии с принципом Парето к 80 % технологических документов, имеющих наиболее тесную связь с документами изделия, относятся: УП, ОК, ТД СТО, МК, КН.

Исходя из полученных данных, при переводе документов в электронный вид, в первую очередь необходимо обеспечить перевод вышеуказанных документов, а также обеспечить

информационное взаимодействие участников процессов создания изделия – персонала служб и отделов, заинтересованных в формировании этой документации, для реального повышения производительности труда при выполнении работ конструкторско-технологической подготовки производства.

С целью повышения производительности труда при ТПП путем сокращения, времени на создание комплекта документов отработана методика отбора видов документов ТПП, в наибольшей степени связанных с КД изделия, и для отобранных документов определены приоритеты перевода их в электронный вид. Полученные данные необходимы при определении последовательности работ для реализации эффективной электронной информационной поддержки жизненного цикла изделий.

Литература

1. Международная энциклопедия CALS-технологий. Авиационно-космическое машиностроение./Гл. ред. А.Г. Братухин. – М.: НИЦ АСК, 2015. – 608 с.

2. Злыгарев В.А., Юрин В.Н. Анализ производительности инженерного труда для построения CALS–систем. / V Международная конференция–форум «Применение ИПИ (CALS) – технологий для повышения качества и конкурентоспособности наукоемкой продукции». Материалы конференции. – М.: ООО Издательский дом «МВМ», 2003. – С. 75-79.

3. Бюмберг В.А., Глущенко В.Ф. Какое решение лучше? Метод расстановки приоритетов. – Л.: Лениздат, 1982. – 160 с.

4. Андерсен Б. Бизнес-процессы. Инструменты совершенствования. – М.: РИА «Стандарты и качество», 2005. – 272 с.

## Разработка и применение 3D-мнемосхем в составе информационно-измерительной системы

Бостенков А.А., Самсонов Н.А.
Научный руководитель — Кириллин А.В.
МАИ, Москва
artembostenkov@inbox.ru

Современная информационно-измерительная система не мыслима без комплекса достаточно сложной обработки информации, полученной не только путем ручного ввода, но и на основании автоматических измерений [1]. К обработке информации можно отнести: автоматизированный сбор, преобразование, агрегирование, хранение, передачу и представление информации.

Одной из важнейших задач автоматизированных систем является реализация взаимодействия между человеком и программно-аппаратным комплексом [2].

Человеко-машинный интерфейс подобных систем должен отвечать современным эргономическим требованиям, должен быть понятным и информативным.

Применительно к информационно-измерительным системам важно не только осуществить правильный контроль или испытание, но и в полной мере представлять данные, полученные в ходе проверок. Развитие 3D-технологий позволяет решить эту задачу и привнести новые тенденции в область визуализации данных.

Одним из способов визуализации данных в составе информационно-измерительных систем является применение мнемосхем, которые в классическом своем понимании представляют двухмерную картинку.

Внедрение 3D-технологий позволит обойтись без схематичного изображения объектов, вместо этого можно использовать трехмерные модели объектов, которые будут в точности или с заданной долей достоверности повторять свои реальные прототипы.

Программный компонент способен осуществлять все необходимые и заявленные операции: импорт 3D-модели в среду программы без ее перекомпиляции, установку пользователем в произвольном месте модели и настройку виртуальной измерительной аппаратуры, свободное перемещение в пространстве для всестороннего осмотра модели объекта контроля.

Благодаря применению современных 3D-технологий удалось обновить и улучшить процесс восприятия графической информации. Применительно к мнемосхемам 3D открывает новые возможности по визуальному восприятию реальных технологических операций.

На примере трехмерной мнемосхемы удалось установить, что тех преимуществ, которые она предоставляет по сравнению со своим двухмерным аналогом, достаточно, чтобы данный компонент нашел свое применение в составе информационно-измерительного комплекса.

На данном этапе 3D-мнемосхема функционирует отдельно от измерительного ПО, но в перспективе возможен вариант, когда подобные компоненты будут интегрированы в программную составляющую.

Список использованной литературы

1. Перцовский М.И., Микельсон О.В., Ртищев А.В. Унифицированная интегрированная система автоматизации как основа реконструкции и технического перевооружения испытательной базы крупных промышленных предприятий. // Автоматизация в промышленности. 2015. № 10. С. 3-11.

2. Иосифов П.А., Перванюк А.С., Шишкин В.А. Проблемы совместного использования различных устройств сбора и передачи данных в составе контрольно-измерительной системы. // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2012. Т. 8. № 3. С. 31-36.

## MiLogistic - поддержка принятия решений и автоматизация процессов диспетчеризации грузоперевозок цифрового производства

Голомазов А.В.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Смирнов Н.Я.
МАИ, Москва
milord-company@yandex.ru

«Наибольшую опасность на дорогах представляет машина, которая едет быстрее, чем способен думать её водитель»

Роберт Лембке.

Ни одно производство в наши дни не может обойтись без информационных технологий, тем более без них не обходится в сфере цифрового производства. Реалии современного мира таковы, что продукция производится отдельными узлами и каждый конкретный узел собирается в различных географических регионах на удалении друг от друга. В этот момент очень остро встаёт вопрос логистики. Необходимо доставить готовые узлы в сборочный цех, пополнить запасы предприятия, перевезти готовую продукцию на склад, или вовсе доставить сотрудников, работающих вахтовым методом к их рабочим местам.

Актуальность решения данных задач связана с необходимостью повышения качества удовлетворения изменяющихся информационных потребностей пользователей (ИПП) в трудноразрешимых (экстремальных) ситуациях. [2]

Если выполнять все грузоперевозки силами собственного корпоративного транспорта, или силами одного подрядчика – больших проблем не возникает, но содержать собственный автопарк – дорого, а работать с одним подрядчиком неэффективно. Поэтому крупные корпорации заключают договоры с сотнями подрядчиков и тут встаёт настоящая проблема: «Как эффективно распределить заказы на грузоперевозку?», «Какому подрядчику отдать

заказ, учитывая различающиеся тарифы?», «Как застраховать риск поломки автотранспорта в момент выполнения заказа?».

Мы провели исследование, пообщались с десятком различных корпораций и выяснили, что на эти вопросы отвечает диспетчер, который, учитывая человеческий фактор, не может анализировать весь рынок транспортных услуг одновременно. Для решения проблемы мы создали цифровую платформу «MiLogistic» - интеллектуальная логистическая система нового поколения.

В основу «MiLogistic» легли принципы пиринговой сети (P2P), интеллектуального многоагентного подхода на основе JADE Framework, самые эффективные математические подходы для решения поддержки принятия решений, а также теория игр. В данный момент также рассматривается эффективность использования технологии блокчейн для безопасного заключения автоматических цифровых контрактов.

«MiLogistic» работает на языке JAVA и поддерживает кроссплатформенную архитектуру. Основывая приложение на JADE, мы достигаем успешной работы, как на персональных рабочих станциях, так и на мобильных устройствах. [1]

Интеллектуальный многоагентный подход позволяет каждому физическому объекту создать его программный «аватар», представляющий интересы данного объекта в интеллектуальной системе и наделённый принципами поведения этого объекта. Общаясь и взаимодействуя внутри платформы, интеллектуальный агент находит самый выгодный вариант развития событий так, будто сам человек искал решение для себя, но делают это в полностью автоматическом режиме.

Агентам предписывается решение задач формирования информационной поддержки принятия решений (ИППР) в следующих ситуациях:

- нормирования процессов;
- планирования;
- мониторинга (учета);
- контроля;
- анализа;
- выбора и принятия решения. [3]

Алгоритмы поддержки принятия решений наделяют каждый агент уникальной логикой, которая видоизменяется и адаптируется под каждую конкретную задачу. Для небольших предприятий такие алгоритмы получаются довольно простыми, для крупных международных предприятий доставляющим продукцию несколькими типами транспортных средств, имеющих заграничные подразделения алгоритмы получаются далеко не тривиальными. Здесь накладывается большое количество рисков, участников, включая таможенные процедуры и возникает масса конфликтных ситуаций, которые также успешно разрешают интеллектуальные агенты системы «MiLogistic».

В конечном итоге благодаря внедрению интеллектуальной логистической системы «MiLogistic» предприятиям больше не придётся задумываться о вопросах логистики. Оператору предприятия достаточно открыть окно создания заявки, описать параметры груза и сроки исполнения заявки и «MiLogistic» найдёт и согласует все требуемые ресурсы, выполнив заказ в срок без участия в процессе оператора, а гибкие API интерфейсы позволят произвести интеграцию с цифровым производством для составления автоматической заявки, исключив тем самым ручную работу оператора.

Список литературы

1. Голомазов А. В. Гагаринские чтения - 2017 [Конференция] // «MiLogistic» – продукт с инновационным подходом к транспортной логистике с использованием JADE Framework. - Москва : Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2017.

2. Смирнов Н.Я. Аносенко А.В. Предпосылки и проблемы повышения устойчивости функционирования систем информационной поддержки процессов принятия решений в экстремальных ситуациях [Журнал]. - Москва : Технология машиностроения, 2007 г.. - 9.

3. Смирнов Н.Я. Голомазов А.В. Особенности применения мультиагентных систем в предметных областях транспортной логистики в условиях неопределенности [Журнал]. - Москва : Успехи современной науки, 2016 г.. - 11 : Т. 2.

## Метод реинжиниринга каретки закрылка крыла самолета

Грицай О.Ю.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Куприков М.Ю.
МАИ, Москва
olgagri07@mail.ru

Самолет – большая и сложная техническая система, которая состоит из 106 агрегатов. Несмотря на разнообразие типов, все самолеты имеют одну и туже номенклатуру деталей, выполняющие аналогичные функции. Разработка конструкторской документации самолета, а также создание отдельных его элементов представляется важной и ответственной задачей.

Целью данной работы является разработка научно-методического обеспечения реинжиниринга агрегата ЛА, который является частью механизации закрылка самолета Ил-62. Разработанный метод реинжиниринга позволяет с точностью в 2% разработать конструкторскую документацию.

Каретка закрылка Ил-62 состоит из 23 деталей различной конфигурации, многие из которых встречаются до 8 раз. Выявленная номенклатура деталей сборки агрегатов позволила декомпозировать сборку, разработать схему деления и спецификацию, которые позволили провести твердотельное моделирование и выполнить виртуальную сборку агрегата, что сократило время разработки 2-3 раза.

Основа каретки изготавливается из стали 30ХГСА на станке фрезеровальном с последующей закалкой и кадмиевым покрытием, «Дворники» – методом литья из полиэтилена. Остальные детали агрегата изготавливаются по ГОСТам и ОСТам.

Перед созданием твердотельной модели были определены 6 конструкторских баз, а именно: 4 оси, на которых располагаются роликовые подшипники, ось крепления карданного вала и плоскость симметрии агрегата. 3D-модель каретки закрылка Ил-62, созданная в программном продукте SolidWorks 2013, получена из 23 твердотельных моделей деталей агрегата. Общее количество деталей в сборке – 130 шт. Определение баз построения помогло правильно спозиционировать деталь в пространстве.

Сканирование агрегата с помощью Faro Arm Fusion позволило получить облако из 980 тысяч точек, которое впоследствии было обработано и преобразовано в программе Geomagic Studio 12 в полигональную модель, состоящую из 1978 тысяч треугольников.

Сравнение полученной после сканирования модели с построенной ранее твердотельной производилось в среде Geomagic Qualify 12. По полученному совмещению моделей картеки удалось получить графическое сравнение в виде цветовой палитры отклонений (до 8,2 мм в каждую сторону). Данный разброс значений связан с тем, что сравнивались твердотельная модель корпуса каретки и полигональная сборка. Основная часть агрегата находится в диапазоне от -1,22 мм до 1,22 мм. Среднеквадратичное отклонение осей крепления подшипников – 0,43%.

В заключение всего вышесказанного стоит отметить, что для проведения реинжиниринга следует пользоваться измерительными приборами с малой погрешностью, тогда отклонение получается минимальным и точность изготовления деталей возрастает. Примером такого устройства является используемый в данной работе 3D-сканер Faro Arm Fusion. Не обязательно использовать лазерную головку, будет достаточно сканирования

контрактным методом, с помощью которого будет определено взаиморасположение основных точек агрегата в пространстве.

## Разработка технологии автоматизированной сборки авиационных конструкций

Егоров П.А.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Белых С.В.
КнАГУ, Комсомольск-на-Амуре
lainis653@gmail.com

В настоящее время основные технологии сборки летательных аппаратов основываются на поэтапной установке изделий в стапель. Базирование при такой сборке выполняется по базовым элементам сборочного приспособления.

Современная тенденция внедрения компьютерного моделирования и проектирования позволяет перейти к системам автоматизации сборки. На смену сборке с большой долей ручного труда оборудованы роботизированные участки в компаниях Airbus, Boeing, Dassault Aviation и др. Целый ряд машиностроительных фирм выпускают сегодня промышленные роботы для автоматизации агрегатно-сборочного производства.

Применение современных технологий и цифрового оборудования при изготовлении деталей позволяет отказаться от применения традиционной оснастки для агрегатной сборки.

Отказ от оснастки влечет за собой изменения в способах базирования. Поэтому в разрабатываемой технологии рассматриваются варианты базирования по сборочным отверстиям с применением методов лазерного контроля.

При проектировании технологии особое внимание уделяется точности сборки, а также к точности изготовления деталей. Так как технология разрабатывается с учетом применения роботизированной техники, необходимо обратить внимание и на экономический аспект.

На данный момент спроектированы экспериментальный отсек фюзеляжа, стенд стыковки отсеков фюзеляжа, проектируются стенды и сборочные приспособления для изготовления панелей отсека и стыковки их между собой.

Сопровождается это расчетами прочности конструкции, точности сборки самих приспособлений, точности базирования деталей в сборочные приспособления. Планируется внедрение контроля точности базирования элементов в СП с помощью современных средств лазерного контроля.

По окончании планируется провести широкую оценку технологии, сравнить её с имеющимися и сформулировать требования к вновь создаваемым технологиям, выдвинуть критерии оптимизации к уже имеющимся технологиям. Если потребуется, выдвинуть новые требования к конструкции планера самолета чтобы облегчить переход к новым технологиям сборки.

Список использованных источников

1 Ахатов, Р.Х. Современные методы и средства монтажа сборочной оснастки / Р.Х. Ахатов, А.С. Говорков. – Изд-во НИ ИрГТУ, 2011. – 76 с., ил.

2 Неэвклидова экономика/С. Арасланов//Авиация общего назначения: научно-технический журнал, Харьков, №2, 2012, с. 13–23.

3 Сборка 4.0 // Горизонты. – 2017. №3(15). – С. 19-21.

# Использование экспертных оценок при модернизации автоматизированных систем технологической подготовки производства

Загребин В.С., Беличенко С.С.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Юрин В.Н.
МАИ, Москва
johoisjoho@gmail.com

Конкурентоспособность промышленности в настоящее время во многом определяется системным использованием информационных технологий на всех стадиях жизненного цикла изделий [1]. В силу высокой стоимости необходимых технических и аппаратно-программных средств, затрат на внедрение и повышение квалификации персонала цифровое производств не возникает одномоментно, а формируется (развивается) постепенно [2], по мере освоения соответствующих аппаратно-технических средств, обучения персонала, встраивания в деятельность предприятия, изменении нормативной документации участников процессов.

В связи этим актуальна постоянная модернизация – развитие существующих автоматизированных систем технологической подготовки производства (АСТПП), путем внедрения на предприятии технологий цифрового производства, базирующихся на современных информационных технологиях.

Была проведена групповая экспертная оценка предложения авторов доклада по модернизации АСТПП базового предприятия с участием экспертной группы, в которую вошли опытные специалисты предприятия, а также студенты МАИ, работающие там же. Эксперты выполнили сравнение двух разработанных авторами доклада функциональных моделей проведения АСТПП (IDEF0 – диаграмм), описывающих производство как совокупность ряда модулей и их взаимосвязей. Одна из них является моделью “как есть” и описывает существующую на предприятии АСТПП, вторая – моделью “как должно быть”, описывающая вариант модернизации АСТПП на базе использования аннотированной электронной модели изделия.

Для оценки функциональных моделей использовались критерии, удовлетворение которых является индикатором эффективного использования информационных технологий при технологической подготовке производства. Критериями являются следующие отличительные особенности проведения АСТПП:

1. электронный документооборот, исключение бумажных технических документов;
2. структурированные электронные документы, в том числе использование конструктивно-технологических элементов при технологической подготовке производства;
3. совместное использование данных и документов, хранящихся в единой базе данных изделия;
4. осуществление принципа однократного ввода информации и многократного ее использования;
5. информационный обмен в гомогенной и гетерогенной средах (PLM, CALS решения);
6. проектирование не от чертежа или 2D модели, а от аннотированной 3D модели изделия;
7. исключение чертежей (бесчертежное производство);
8. тотальное использование прикладных информационных технологий во всей цепочке работ технологической подготовки производства;
9. разработка и использование экспертных систем для обоснования принятия решений при АСТПП.

Экспертиза проводилась по методике работы [3] с определением коэффициентов квалификации и значимости экспертов, коэффициентов значимости для каждого из

критериев. При этом каждый из экспертов группы проставлял бальные оценки по вышеуказанным критериям для обеих моделей. По полученным оценкам определены средние арифметические значения для каждого из вариантов АСТПП и доверительные интервалы. Наиболее полно удовлетворяет установленным критериям при заданном уровне значимости модернизированная АСТПП: групповые оценки: по модели “как есть” – 51,62 балла; по модели “как должно быть” – 82,36 балла. При этом различие индивидуальных и групповых оценок составило: для модели “как есть” – 4 %; по модели “как должно быть” – 7 %.

Предложенная модель АСТПП на базовом предприятии, основанная на полномасштабном использовании аннотированной 3-D модели изделия приведет к повышению производительности труда при технологической подготовке производства. Групповая экспертиза имеет большую достоверность чем индивидуальная [3], но при этом разница в оценках является несущественной, так что с учетом меньших затрат времени и трудоемкости проведения оценивания важно каждому специалисту развивать компетенции оценивания альтернатив, начиная с обучения.

Литература

1. Международная энциклопедия CALS-технологий. Авиационно-космическое машиностроение. /Гл. ред. А.Г. Братухин. – М.: НИЦ АСК, 2015. – 608 с.

2. Злыгарев В.А., Юрин В.Н. Анализ производительности инженерного труда для построения CALS–систем. / V Международная конференция–форум «Применение ИПИ (CALS) – технологий для повышения качества и конкурентоспособности наукоемкой продукции». Материалы конференции. – М.: ООО Издательский дом «МВМ», 2003. – С. 75-79.

3. Курицына В.В., Косов Д.Е., Курицын Д.Н. Автоматизация задач экспертного оценивания в процедурах технологического менеджмента авиационного производства.//Научные труды (Вестник МАТИ), 2012. Вып. 19 (91). - С. 162-173.

## Метод реинжиниринга цельноповоротного горизонтального оперения летательного аппарата

Изгагина К.А.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Куприков М.Ю.
МАИ, Москва
kira-arti@yandex.ru

Целью данной работы являлась разработка метода реинжиниринга цельноповоротного горизонтального оперения (далее - ЦПГО) летательного аппарата (далее – ЛА) на примере имеющегося в наличии руля управления ракеты с помощью средств по 3D-сканированию и систем автоматизированного проектирования, позволивших построить точную копию ЦПГО в цифровом формате с заданной точностью.

Первый этап работы представлял собой теоретический поиск и сопутствующие расчеты, что включало в себя:

- определение модели ЛА как ракеты с индексом 4К90 на основе имеющихся исходных данных по ЦПГО;
- определение материалов, из которых изготовлен представленный руль, а также стандартных деталей и их ГОСТов;
- составление схемы деления ЦПГО, в состав которого входит 222 детали с учетом заклепок, как одного из основных элементов единой системы конструкторской документации (далее – ЕСКД);
- составление документа «Технические условия», необходимого для производства деталей и сборки ЦПГО;

• определение конструкторских баз ЦПГО и теоретического аэродинамического профиля стабилизатора для построения твердотельной модели в САПР.

Второй этап работы заключался в сканировании ЦПГО измерительной рукой для 3D-сканирования FaroArm Fusion и построении твердотельной модели сборки в SolidWorks. Были вычислены среднеквадратичное отклонение и процент погрешности измерений между теоретическим аэродинамическим профилем и реальным отсканированным профилем, минимальные значения которых составили 0,396 мм и 2,55% соответственно. Далее была создана электронная модель сборки ЦПГО, стабилизатор в которой был построен на основе составления линейчатой поверхности. На моделях деталей были обозначены места размещения их маркировок с учетом легкодоступности и удобочитаемости. По окончании этапа был составлен сборочный чертеж ЦПГО и спецификация.

Результатом работы является разработанный метод реинжиниринга ЦПГО ЛА, который может быть применен для моделирования оперений как ракет, так и вертикальных и горизонтальных оперений самолетов и вертолетов. В то же время данный метод может быть транслирован на разработку других конструкций ЛА, в том числе планера.

## Моделирование статических испытаний на прочность кессона крыла самолета Ил-76МД-90А

Кальмин В.В.
Научный руководитель — Кириллин А.В.
МАИ, Москва
racoonmafaka@yandex.ru

Перед проведением испытаний, были произведены расчёты нагрузок, действующие на крыло во время полёта. Были найдены подъёмная сила и сила лобового сопротивления, воздушная и массовая нагрузки, силы реакции в местах закрепления лонжеронов к центроплану самолёта, определены нормальные и касательные напряжения, а также рассчитан прогиб крыла. После нахождения всех значений была описана методика воспроизведения нагрузок на испытательном стенде. Был описан стенд, на котором проводят статические испытания на прочность и нагружающие устройства. После чего был описан полный цикл подготовки расчётной модели кессона крыла самолёта Ил-76-МД-90А в программной среде NX Advanced Simulation. NX включал в себя следующие этапы: создание идеализированной модели, создание конечно-элементной (КЭ) модели, создание расчётной модели, численное решение задач, анализ полученных результатов. В конце производились сравнения данных, полученных экспериментальным путём на испытательном стенде и с данными, посчитанными в программной среде NX Advanced Simulation. Результаты отличаются незначительно в пределах границ толерантных интервалов при заданном уровне доверия в 95%. В ходе проведённого анализа наибольшее рассогласование результатов было получено по данным моделирования испытаний 43 нервюры. Точностные характеристики в этом случае могут быть повышены за счёт уменьшения сетки при КЭ анализе геометрической модели части кессона крыла, где расположена 43 нервюра, а также за счет увеличения объема статистического моделирования и уровня значимости. Также адекватность полученных результатов может быть повышена на этапе объединения информации моделирования статических испытаний [1,2] и результатов натурной отработки кессона в случае если это подразумевается принятыми методиками оценки соответствия.

Внедрение 3D – моделирования в авиакосмическую промышленность, снижает стоимость изделия и уменьшает вероятность срыва сроков поставки продукции. Применение 3D – моделирования позволяет оценивать поведение конструкции при воздействии на него различных внешних факторов. При конечно-элементном моделировании частично заменяется дорогостоящий натурный эксперимент более дешёвым и рациональным

вычислительным экспериментом. Современный уровень компьютерной техники позволяет решать более сложные задачи на мощных рабочих станциях достаточно быстро.

Литература

1. Александровская Л.Н., Кириллин А.В. Системный подход в обеспечении качества испытаний изделий авиакосмической техники. – М.:Изд-во МАИ, 2017. – 160 с.:ил.

2. Александровская Л.Н., Кириллин А.В. Обобщение байесовского подхода в задачах объединения разнородной информации процесса экспериментальной отработки сложных технических систем. // В сборнике: Управление качеством Избранные научные труды Пятнадцатой Международной научно-практической конференции. 2016. С. 47-51.

## Исследование возможностей технологии цифрового производства в образовательном процессе

Комарова Е.С., Альшакова Е.А.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Альшакова Е.Л.
ЮЗГУ, Курск
katya.a_komarova@mail.ru

Применение цифровых технологий производства сокращает время выпуска новых изделий на рынок, автоматизирует процесс проектирования от идеи до подготовки комплекта чертежей и организации технологического процесса производства, уменьшает финансовые затраты на создание модели изделия.

В основе технологии цифрового производства находится цифровая модель объекта (цифровой прототип изделия) и взаимодействие с моделью на всем жизненном цикле в едином информационном пространстве, за счет чего и сокращаются сроки проектирования, выхода новых продуктов на рынок, стоимость производства продуктов.

Исследование возможности применения технологии цифрового производства в образовательном процессе, а также подготовки квалифицированных кадров, владеющих данной технологией, является актуальной задачей.

Для решения поставленной задачи в учебный процесс дисциплины «Инженерная и компьютерная графика» внедрены программные продукт САПР Autodesk Inventor, реализующий технологию цифровых прототипов, и КОМПАС 3D [1]. Предлагается использовать при изучении дисциплины «Инженерная и компьютерная графика», а также при выполнении индивидуальных заданий программный продукт Autodesk Fusion 360 – комплексный облачный CAD/CAM/CAE инструмент, используемый для разработки и производства изделий [2].

Подготовлен лабораторный практикум по выполнению командных и индивидуальных проектов с создания 3D моделей изделий, анимации поведения изделия, инженерного анализа. Организована совместная параллельная работа в единой среде проектирования и управления данными [3]. В рамках лабораторного практикума выполнены проекты: сборочная единица «Насос густой смазки» – двухплунжерный нагнетательный насос, который входит в состав станции для автоматической подачи густой смазки к трущимся поверхностям механизмов через определенные промежутки времени, в соответствии с принятым режимом смазывания; сборочная единица «Лубрикатор» – аппарат, предназначенный для автоматической централизованной подачи жидкой смазки под давление к поверхностям трения; сборочная единица «Манипулятор», предназначенный для работы с гамма-излучателями при перезарядке и ремонте контейнеров, для работы с ампулированными гамма-излучателями с активностью не выше 1000 г*экв_радия и др [4, 5].

Программный продукт Autodesk Fusion 360 студенты могут использовать для выполнения собственных коммерческих проектов, т.к. цена программного продукта

доступна и все процессы проектирования изделия объединение в единой облачной платформе.

По окончанию обучения по дисциплине студенты имеют возможность владеть современными инструментами проектирования и изготовления изделий, такими как цифровое 3D моделирование, симуляция работы, создание цифровых прототипов, 3D печать, работа на станке с ЧПУ, знать жизненный цикл изделия и технологический процесс.

Литература

1. Альшакова Е.Л. Технология цифровых прототипов: модель, инженерный анализ, документация, совместная работа // Сборник научных трудов Международной научно-технической конференции «Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике». Выпуск 2 (XXII) / Под редакцией д.т.н., проф. Кондратенко В.С. – М.: Московский технологический университет, 2016. – С. 214 – 217.

2. Альшакова Е.А. Проектирование и расчет изделий с использованием Autodesk Inventor // Гагаринские чтения – 2017: XLIII Международная молодёжная научная конференция: Сборник тезисов докладов: М.; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2017, – С. 667 – 668.

3. Юрин В.Н. Компьютерный инжиниринг в инженерном образовании: эволюция // Труды XXII Международной научно-технической конференции «Информационные средства и технологии». В 3-х томах. М.: Издательский дом МЭИ, – 2014. – Т. 2. – С. 102 – 108.

4. Альшакова Е.А. Инновационные инструменты проектирования в учебном процессе: 3D моделирование, совместная работа, облачные сервисы // Преподавание информационных технологий в Российской Федерации: материалы Пятнадцатой открытой Всеросс. конф., Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет, 2017, – С. 131 – 134.

5. Альшакова Е.Л., Альшакова Е.А. Исследование возможности проектирования и расчета узлов с Autodesk Inventor // Сборник научных трудов: материалы Международной научно-технической конференции «Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике»; Московский технологический университет, Физикотехнологический институт. Выпуск 23 (XXIII) / Под редакцией д.ф.-м.н., проф. Булатова М.Ф. – М.: 2017. – С. 278 – 280.

## Разработка и исследование системы обеспечения устойчивости и управляемости в канале тангажа перспективного транспортного самолета

Кудрявцев А.В.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Куликов С.Н.
МАИ, Москва
kudriavtzeff.aleksei@yandex.ru

Современная авиация характеризуется ростом требований к безопасности полета, комфорта при управлении летательным аппаратом, так же жестко регламентируются все основные характеристики устойчивости и управляемости в боковом и продольном движении самолета. Приоритеты при создании пассажирских самолетов постепенно меняются, однако безопасность неизменно является важнейшей характеристикой самолета и всей авиационной транспортной системы. Требования безопасности становятся еще более актуальными в настоящее время, так как ожидается, что интенсивность воздушного движения возрастет в 3 раза в ближайшие 20 лет. При использовании современных бортовых и наземных систем это может привести к увеличению числа авиационных происшествий в такой же или даже большей пропорции, что недопустимо, и поэтому уже сейчас, на этапе проектирования перспективных самолетов, должны быть найдены новые технические решения, позволяющие снизить уровень авиационных происшествий или по крайней мере не допустить его роста.

Характерной особенностью является то, что с развитием авиации область режимов, на которых самолет хорошо или удовлетворительно управляется, уменьшается. Так для периода 1939-1945 годов самолет был хорошо управляем на всех режимах его использования, самолет периода 50-х только на 42% его режимов, а современный самолет примерно на 6% его рабочих режимов. Таким образом в течении последних трех десятилетий аэродинамики старались спроектировать самолет так, чтобы присущая ему устойчивость, определяемая аэродинамическими производными, обеспечивала удовлетворительную управляемость. Сейчас совершенно очевидно, что эту проблему нельзя решить лишь аэродинамическими средствами и необходимо путем введения средств автоматизации обеспечить требуемые характеристики управляемости.

В данной работе проведено исследование характеристик устойчивости и управляемости перспективного транспортного самолета без АСУУ, разработана система управления продольного канала, улучшающая характеристики устойчивости и управляемости, повышающая удобство и безопасность пилотирования.

## Метод реинжиниринга и модернизации автомата перекоса

Назаров И.С.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Куприков М.Ю.
МАИ, Москва
redtechdigit@gmail.com

Целью данной работы являлся анализ и метод реинжиниринга одного из наиболее ответственных агрегатов многоцелевого вертолета Ми-2 – автомата перекоса с его последующей модернизацией для увеличения общего ресурса работы данного ЛА.

Проведение модернизации узлов и агрегатов данного летательного аппарата является актуальной по причине того, что на сегодняшний день в эксплуатации находятся более сотни вертолетов Ми-2 разных модификаций в более чем 20 странах. Данная модель вертолета успешно зарекомендовала себя в различных целях применения в гражданских и военных сферах. Обновление деталей автомата перекоса позволит увеличить ресурс многоцелевого вертолета Ми-2 и пролонгировать его «срок актуальности», поскольку данный ЛА выпускается уже более 50 лет.

Первым этапом работы было проведение структурной декомпозиции агрегата «Автомат перекоса» в ходе которой была составлена схема деления и установлено, что основными узлами являются: Направляющая ползуна, Ползун, Кронштейн, Наружное кольцо кардана, Внутреннее кольцо кардана, Тарелка, Качалка поперечного управления, Тяга поперечного управления, Качалка продольного управления, Тяга продольного управления, Поводок, Тяга поворота лопастей.

При анализе физической модели было выявлено, что отсутствуют следующие детали:

- Направляющая ползуна
- Тяга поворота лопастей на рычаге №2
- Концевые вилки на тягах поворота лопастей
- Фиксатор шкалы качалки продольного управления

В рамках второго этапа реинжиниринга автомата перекоса многоцелевого вертолета Ми-2 было произведено следующее:

- Разработана электронная модель изделия в CAD системе Dassault SolidWorks 2017
- Определены материалы, используемые в данном изделии: Сталь 10, Сталь, 20, Сталь 25, 12Х2Н4А, 30ХГСА, 30ХГСН2А, 38ХА, ШХ15, 60С2А, АК6, В95, БрАЖ9-4, Л68
- Проведено сравнение массовых характеристик физической и электронной модели агрегата. Отклонение массы электронной модели составило 4.38% в меньшую сторону, что входит в установленный допуск отклонения в размере 5%.

- Разработан набор конструкторской документации.

На третьем этапе работы была произведена модернизация высоконагруженного узла автомата перекоса – изменена деталь «Тарелка». С применением нового алюминиевого сплава 1933 были достигнуты следующие результаты:

- Предел прочности материала 1933 выше предела прочности материала АК6 на 33,4%, предел текучести выше на 67.6%, а плотность выше лишь на 9%, что удовлетворяет установленным требованиям.
- Увеличена допустимая нагрузка на рычаги детали «Тарелка». Предыдущая допустимая максимальная нагрузка составляла 35000Н. Применение нового материала позволило увеличить максимальную нагрузку до 60000Н, что на 71% больше по сравнению с использованием старого материала.
- Масса детали «Тарелки» при использовании алюминиевого сплава 1933 увеличилась лишь на 9%

Результатом данной работы является комплексный анализ агрегата «Автомат перекоса» многоцелевого вертолета Ми-2, разработанная электронная модель, модернизация высоконагруженной детали «Тарелка».

## Учебный модуль для подготовки специалистов по проведению монтажно-стыковочных работ степеней ракеты-носителя

Сальников Н.А., Сыромятников Н.А.
Научный руководитель — Кириллин А.В.
МАИ, Москва
nikolay.salnikov@outlook.com

Учебный модуль разрабатывается для подготовки технических специалистов по эксплуатации СТС, а именно специалистов по проведению монтажно-стыковочных работ 1-й и 2-й ступеней РН и предназначен для отработки самостоятельных практических умений и навыков.

Учебный модуль представляет собой электронный тренажер, который имитирует условия близкие к реальным при проведении монтажно-стыковочных работ и является особенно эффективным для обучения сложных условиях и при отработке противоаварийных ситуаций [1,2].

Модуль работает в режиме тренаж. Тренаж позволяет отрабатывать строго прописанную в инструкции последовательность действий, что обеспечивает прочное закрепление умений и навыков у обслуживающего персонала. Тренажер может применяться для обучения, как под руководством преподавателя, так и во время самостоятельной подготовки в составе учебно-тренировочного комплекса КРК [3].

Также модуль может работать в режиме экзамена. К проведению работ по данной инструкции допускается специально обученный персонал, прошедший подготовку по изучению изделия, агрегатов наземного оборудования и сдавший зачет по знанию данной инструкции, инструкций по эксплуатации средств обслуживания, а также зачет по знанию своих функциональных обязанностей.

При проектировании учебного модуль важно учесть, что трехмерные модели, входящие в состав этого модуля, содержат множество однотипных и многократно повторяющихся элементов. Для ускорения процесса моделирования необходимо создать библиотеку элементов.

Библиотека элементов – это набор экземпляров многократно повторяющихся объектов в сцене. Библиотека элементов разрабатывается в 3ds Max и состоит всего из одного файла в формате FBX. Библиотека экспортируется в Unity3D всего один раз и находится в папке Assets. Важно учесть, что все элементы библиотеки должны называться согласно своему

названию и шифру в инструкции. Библиотека облегчает задачу при моделировании и анимации каждого элемента. Используя библиотеку достаточно всего один раз смоделировать объект, придать ему анимацию вращения и перемещения и использовать его в дальнейшем не только в одном проекте, но и в других учебных модулях.

Литература

1. Иосифов П.А., Перванюк А.С. Применение Web-ориентированного подхода на основе информационных фрагментов при построении учебно-тренировочных средств. // Автоматизация в промышленности. 2011. № 7. С. 48-52.

2. Медведев А.А., Бизяев Р.В., Иосифов П.А., Белкин А.А. Информационное сопровождение НСО изделий РКТ в режиме реального времени. // Решетневские чтения. 2015. Т. 1. № 19. С. 383-384.

3. Иосифов П.А., Перванюк А.С., Вергер А.Е. Интеграция учебно-тренировочных комплексов в информационную структуру предприятия как средство повышения эффективности процессов подготовки и переподготовки технических специалистов. // Сварочное производство. 2012. № 9. С. 51-57.

## Построение единого информационно-технологического пространства экспериментально-испытательной стендовой базы

Седова Ю.Е.

Научный руководитель — Кириллин А.В.

МАИ, Москва

sedova.ul@gmail.com

Построение единого информационно-технологического пространства экспериментально-испытательной стендовой базы

Система единого информационно-технологического пространства (ЕИТП) является неотъемлемым элементом производственно-технологической среды корпорации и применяется на всем жизненном цикле процессов испытаний изделий выпускаемых классов: планирование и подготовка, проведение всех видов испытаний, обработка результатов и формирование сквозной отчетности.

Создание комплексной автоматизированной информационной системы эксплуатации экспериментально-испытательной базы, позволит интегрировать информационные потоки на всех уровнях организации и проведения испытаний изделий: уровень систем локальной автоматизации испытательных стендов и оборудования, уровень испытательных подразделений, уровень предприятия, уровень корпорации [1].

Главной целью внедрения системы ЕИТП испытательной базы является переход к единой технологии организации испытаний, централизации и унификации доступа к данным различных испытаний, проводимых в разное время и, как следствие, повышение качества и конкурентоспособности разрабатываемой продукции.

Автоматизированное планирование и моделирования испытаний позволяет перейти к увеличению числа комплексных испытаний и существенно уменьшить количество промежуточных испытаний изделий и их элементов.

Применение системы ЕИТП позволяет решить следующие задачи:

- ведение реестра испытательно-стендовой базы, содержащего сведения о наличии, техническом состоянии и параметрических характеристиках испытательных стендов и оборудования;
- отслеживание текущего состояния (мониторинг) процессов подготовки и проведения испытаний изделий;
- контроль за принятием и выполнением решений на каждом этапе процесса подготовки и проведения испытаний;

- повышение качества принятых решений за счет большей объективности и уменьшения влияния человеческого фактора.

Одним из факторов, влияющих на эффективность внедрения системы ЕИТП, является степень её интеграции в существующую инфраструктуру информационных систем организации.

В состав системы ЕИТП входят следующие хранилища данных:

- БД оборудования и стендовой информации.
- БД документации.
- БД процессов проведения испытаний.
- БД результатов испытаний.

С точки зрения технической реализации система ЕИТП представляет собой программную информационную систему.

Разработка и внедрение системы ЕИТП могут быть выполнены по следующим основным этапам:

- Предпроектное обследование, анализ состава и производственных процессов экспериментально-испытательной базы предприятия.
- Формирование требований к системе, описание основных автоматизируемых процессов.
- Разработка технического задания, определение функционального и модульного состава системы, утверждение плана-графика выполнения работ по адаптации и доработке элементов системы.
- Изготовление опытного образца (макета системы), эскизное проектирование.
- Изготовление модулей системы, доработка требуемого функционала на основе базовой системной платформы, адаптация модулей.
- Помодульное внедрение системы в отдельных подразделениях, предприятиях. Подготовка и обучение персонала.
- Сопровождение и обслуживание системы [3].

Построение системы ЕИТП на основе анализа существующих на предприятии процессов обеспечивает выполнение основных принципов бережливого производства (LEAN-технологий) в части организации, подготовки, проведения испытаний изделий и формирования сквозной отчетности: позволяет определить все необходимые действия в цепочке испытаний продукции, организовать поток работ, оптимизировать выполняемые действия и устранить потери на всех этапах процессов испытаний за счет снижения количества дефектов и избыточных затрат времени и денег [2].

Применение системы ЕИТП позволяет оптимизировать процессы организации, управления и проведения испытаний, повысить производительность труда, уменьшить себестоимость проведения испытаний. Внедрение всестороннего учета и мониторинга хода организации и проведения испытаний в реальном времени совместно с ведением реестра испытательных стендов и оборудования позволяет обеспечить сохранение и устойчивость технологического развития экспериментально-испытательной базы в целом.

Список использованных источников:

1. Медведев А.А., Бизяев Р.В., Иосифов П.А., Белкин А.А. Информационное сопровождение НСО изделий РКТ в режиме реального времени. // Решетневские чтения. 2015. Т. 1. № 19. С. 383-384.
2. Иосифов П.А., Перванюк А.С., Вергер А.Е. Интеграция учебно-тренировочных комплексов в информационную структуру предприятия как средство повышения эффективности процессов подготовки и переподготовки технических специалистов. // Сварочное производство. 2012. № 9. С. 51-57.
3. Иосифов П.А., Перванюк А.С., Шишкин В.А. Проблемы совместного использования различных устройств сбора и передачи данных в составе контрольно-измерительной системы. // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2012. Т. 8. № 3. С. 31-36.

# Цифровой двойник, как инструмент подготовки производства

Степынин С.С.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Ковалевич М.В.
МАИ, Москва
stepininss@mai.ru

Цифровой двойник, как инструмент подготовки производства

С развитием современной цивилизации увеличивается скорость протекающих в мире изменений, такое повышение скорости влечет за собой потребность производства в сокращении времени на изготовление новых продуктов без потери их качества. Большую часть времени при создании нового изделия занимает разработка и постановка его на производство. Для того, чтобы ускорить эти процессы предприятие должно обладать определенной гибкостью и высокой скоростью обмена информацией.

На сегодняшний день большие обороты набирает концепция четвёртой промышленной революции, включающая в себя понятие цифрового производства. Одним из ключевых инструментов цифрового производства является цифровой двойник. Цифровой двойник (ЦД)– это программный аналог физического объекта, моделирующий внутренние процессы, технические характеристики и поведение реального объекта. [1]

Цифровой двойник изделия позволяет параллельно осуществлять конструкторские и технологические работы, что сильно ускоряет разработку изделия. Помимо ЦД изделия моделируются также производственные линии, ЦД производства позволяет провести проверку правильности описания и функционирования разработанных процессов, осуществить виртуальную пуско-наладку до фактического создания линий, проведение этих работ натурно на сегодняшний день составляют значительную часть времени на подготовку производства. По оценкам передовых авиастроительных компаний внедрение цифровых технологий на предпроизводственных этапах сокращает время вывода продукции на 25-75%. Стоит заметить, что уже сейчас некоторые поставщики промышленного оборудования при продаже предоставляют также его ЦД, тем самым облегчая работу по созданию двойников производства.

Цифровое моделирование и сопровождение изделия предоставляет возможность не только увеличить скорость разработки и запуска изделия, но и снизить стоимость производимых работ, поскольку значительно проще вносить изменения в цифровой среде, чем дорабатывать уже созданные физические прототипы и производственные цеха, можно сказать, что, при хорошо отлаженной системе моделирования и цифрового анализа, запуск производства должен происходить без каких бы то ни было доработок. Причём в ходе работы предприятия все технологические процессы поддерживаются в актуальном и синхронизированном состоянии.

Однако, для создания цифровых двойников необходимо сложные цифровые системы на базе различных программ. Большую часть этих программ объединяет PLM система, которая служит средой для совместной работы систем PDM (Система управления данными об изделии), CAE (Инженерные расчеты), CAD (Проектирование изделий), CAM (Разработка управляющих программ для станков с ЧПУ) и др. Необходимо сказать, что случае если программы созданы разными компаниями может возникнуть проблема, связанная с переносом данных из одной системы в другую.

Помимо проблемы с переносом данных для всех подобных программ стоит вопрос о технической поддержке для бесперебойной работы и безопасности такой системы. А в условиях цифровой индустрии при появлении Интернета Вещей проблема кибербезопасности встанет более остро.

В заключение можно сказать, что цифровой двойник является эффективным инструментом сокращения сроков и себестоимости различных работ, и технологической

подготовки производства в частности. Важно отметить, что для успешного внедрения ЦД на производстве должны появиться специалисты, умеющие хорошо работать в цифровой среде и прекрасно понимающие физику моделируемых процессов.

1 Цифровой Двойник (Digital Twin) // https:// cadfem-cis.ru: сайт инженерной компании CADFEM. URL: https://www.cadfem-cis.ru/products/ansys/systems/digital-twin/ (дата обращения: 06.02.2018).

2 Siemens о цифровом двойнике, Интернете вещей, российских реалиях и новинках NX 11// isicad.ru URL: http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=18627 (дата обращения: 06.02.2018).

3 ПРАВИТЕЛЬСТВО, ПРОМЫШЛЕННОСТЬ, ЛОГИСТИКА, ИННОВАЦИИ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ МОБИЛЬНОСТЬ В ЦИФРОВОЙ ЭКОНОМИКЕ // inetique.ru сайт компании INetique URL: http://www.inetique.ru/articles/digital_economy.pdf (дата обращения: 08.02.2018).

4 Как сделать промышленность цифровой// vedomosti.ru сайт газеты «Ведомости» URL: https://www.vedomosti.ru/opinion/articles/2017/08/17/729823-sdelat-promishlennost-tsifrovoi (дата обращения: 08.02.2018).

5 Есть способ лучше: цифровой двойник повысит эффективность процессов конструкторско-технологического проектирования и производства// cadcamcae.lv URL: rhttp://www.cadcamcae.lv/N103/36-40.pdf

6 экономические аспекты внедрения CALS-технологий в авиационной промышленности// books.google.ru гугл книги URL: https://books.google.ru

## Информационное сопровождение результатов трибологических исследований твердосмазочных покрытий

Фурсик М.Ю.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Хопин П.Н.
МАИ, Москва
m.fursik@mail.ru

Твердосмазочные покрытия применяются в различных экстремальных условиях, сухого трения, как в нормальных атмосферных условиях (автомобилестроение, машиностроение, в оборонной промышленности и др.), так и в условиях космического пространства в широком диапазоне температур и контактных нагрузок. В связи с этим важное место занимает исследование трибологических свойств различных материалов и покрытий. Исследование трибологических свойств различных материалов и покрытий позволяет разработать научно обоснованные способы снижения или управления процессом трением, уменьшения и устранения износа.

Для изучения трибологических параметров материалов и покрытий применяются машины трения. Поэтому важной частью системы экспериментальных исследований являются автоматизация и модернизация машин трения, что позволит управлять экспериментом, контролировать и регистрировать измеряемые параметры, обрабатывать получаемую информацию и оформлять результаты исследований.

Была выбрана машина трения 2070 СМТ – 1 для автоматизации и модернизация. Данная машина трения предназначена, для изучения процессов трения и износа металлов, сплавов и жестких конструкционных пластмасс. Автоматизация и модернизация заключается во включении в испытательную машину 2070 СМТ – 1 информационной измерительной системы, выполняющей сбор, обработку данных и предоставляющей результаты в режиме реального времени.

Из изученных конструктивно – технологических характеристик машины трения 2070 СМТ – 1 были подобраны устройства для более точного измерения показателей (датчики,

платы и др.). Использованные устройства подключаются к аналого-цифровому преобразователю (АЦП), которой позволяет с помощью программного комплекса ACTest проводить настройку сценариев эксперимента, осуществлять хранение и поиск нужного сценария в базе данных, проводить сквозную калибровку измерительных каналов, проводить измерения в реальном масштабе времени с одновременной архивацией и визуализацией экспериментальных данных, просматривать и анализировать результаты. В реальном масштабе времени производится первичная математическая обработка и допусковый контроль значений измеряемых параметров. Вся информация сохраняется в формате базы данных и доступна для последующей обработки и сравнительного анализа.

## О способах контроля точности аэродинамического обвода изделий аэрокосмической техники

Хлевина В.Г.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Шемонаева Е.С.
МАИ, Москва
khlevinav@mail.ru

Контроль внешнего обвода агрегатов аэрокосмической промышленности это высокоответственная операция, так как от точного определения данного параметра зависят аэродинамические характеристики конечного изделия. Классически для проведения этой операции используют специализированная оснастка, повторяющая контур контролируемого агрегата, на которой закреплена штанга – эквидистантная линейка, на конце которой установлена игла, вставляемая в контролируемую точку контура агрегата. В случае серийного производства используются целые стенды, в которые устанавливается контролируемый агрегат.

В условиях быстроразвивающегося рынка высокотехнологичных компьютеризированных систем, когда все детали для летательного аппарата изготовлены на станках с ЧПУ с точностью до сотых и тысячных долей миллиметра, подобный метод осуществления контроля не выдерживает конкуренции. Степень точности проведения операции, ограничена точностью изготовления оснастки и контролирующей линейки, высокая трудоемкость проведения операции, установка линейки в необходимую точку зависит от человеческого фактора, применяемость оснастки ограничена серией выпускаемого изделия, при разработке нового, требуется или переналадка существующей оснастки или изготовление новой. Подобная технология была актуальна для изделий, изготавливаемых с использованием плазово-шаблонного метода увязки размеров.

На сегодняшний день, для проведения подобных операций актуально использовать лазерный трекер, мобильную координатно-измерительную машину. Координатные измерения являются универсальными при определении угловых и линейных размеров. Раньше они могли осуществляться только либо на измерительных машинах не уступающих размерами обрабатывающим центрам, либо оптическими приборами с невысокой точностью. Лазерный трекер объединил в себе высокую точность определения координат и мобильность, позволяющую установить прибор в любом месте, а программное обеспечение дает возможность легко и понятно обработать полученные результаты. Так для проведения контроля внешнего обвода агрегатов и изделий в программное обеспечение лазерного трекера загружается математическая модель контролируемого агрегата, далее по реперным знакам на агрегате трекер входит в систему координат. При помощи отражателя, лазерный трекер наводится на контролируемые точки указанные в модели и определяет их реальные координаты. Такой метод исключает человеческий фактор и необходимость изготовления специальной оснастки.

В работе разрабатывается методика измерений координат точек аэродинамического обвода изделий аэрокосмической промышленности.

## Опыт применения модуля Mold Cimatron для проектирования литьевой оснастки модели истребителя МИГ-15

Четверикова А.В.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Калачев О.Н.
ЯГТУ, Ярославль
nastyapetrelli13@gmail.com

Для обеспечения конкурентоспособности предприятия необходимо не только чётко расписать технологические процессы на производстве, но и освоить компьютерно интегрированные системы, позволяющие автоматизировать часть процессов и создать единое информационное пространство от начала проектирования детали до готовой продукции. Частично это достигается использованием CAD/CAM систем, объединяющим возможности 3D-моделирования и разработки управляющих программ, например, Cimatron.

С помощью этой системы автоматизированного проектирования можно не только получить 3D-модель, 3D-сборку, но и спроектировать обработку на станке с ЧПУ, разработать управляющую программу, матрицу и пуансон (верхнюю и нижнюю полуформы), а также – полностью всю литниковую систему. Трехмерная модель изделия, единая база данных, единый интерфейс для конструкторов и технологов являются важными составляющими для эффективной интеграции и взаимопонимания специалистов.

Чтобы продемонстрировать все возможности Cimatron, подготовлена трехмерная модель истребителя МИГ-15. Для создания пресс-формы модели истребителя использован модуль Mold. В этом случае при отливке корпуса истребителя сложной конфигурации хвостового оперения разъем полуформ должен быть ступенчатым, что значительно усложняет проектирования. В ходе создания формопакета применена система международного стандарта HASCO.

Предложена следующая последовательность действий проектировщика: выделение образующих поверхностей модели, построение плоскости разъема, проходящей через характерные образующие линии истребителя, определена габаритная форма будущих матрицы и пуансона, направление расхождения этих деталей в формопакете, созданные новые детали оформлены в отдельные файлы, которые дополнены элементами креплениями к пластинам HASCO.

Поскольку система Cimatron должна быть интегрирована в современных условиях парадигмы цифрового прототипирования с PDM-системой, рассматривается использование ЛОЦМАН:PLM (продукт компании АСКОН) для организации электронного документооборота технической подготовки производства, ведения разнородной информации конструкторских и технологических проектов от зарождения до «электронного» архива.

# Автоматизированная система мониторинга для контроля и управления технологическим процессом плазменно-электролитической обработки деталей сложной формы

Шувалов Г.К.
Научный руководитель — Кириллин А.В.
МАИ, Москва
alconaft2014@gmail.com

На современном этапе развития общества становится очевидно, что повышение производительности, улучшение качества выпускаемой продукции машиностроения, снижение её себестоимости напрямую связано с задачами автоматического управления производственными процессами и технологическими системами.

Повышение уровня автоматизации производственных процессов возможно за счет создания новых систем управления с использованием средств вычислительной техники, персональных компьютеров и необходимого для этого алгоритмического, программного, информационного и технического (технологического) обеспечения.

Метод плазменно-электролитической обработки (ПЭО) широко применяется при подготовке поверхности ответственных деталей энергомашиностроения из нержавеющих сталей перед нанесением защитных вакуумно-плазменных покрытий. Технологический процесс ПЭО отвечает современным экологическим требованиям и позволяет обрабатывать поверхности металлов с высокой производительностью [1]. Повысить эффективность ПЭО позволит автоматизированная система мониторинга плазменно-электролитической обработки.

Автоматизированная система мониторинга плазменно-электролитической обработки деталей должна обеспечивает выполнение следующих функций:

– Контроль текущих параметров протекания технологического процесса (напряжение, потребляемый ток, температура электролита, время обработки);

– Обеспечение сигнализации, при выходе текущих параметров за рамки допустимых;

– Передача контрольных данных на персональный компьютер (ПК) с целью их хранения и дальнейшего анализа;

– Автоматизированная система (АС) мониторинга должна содержать перечень рекомендуемых параметров технологического процесса в зависимости от исходных данных объекта обработки;

– Передача данных о технологическом процессе на ПК-оператора.

Отличительными чертами разработанной системы являются: возможность настройки, универсальность и хорошая масштабируемость, низкая, в сравнение с другими системами стоимость.

Список использованной литературы

1. Аникин К.А., Борисов А.М., Желтухин А.В., Жуков А.А., Крит Б.Л., Савушкина С.В., Федичкин И.Д., Эпельфельд А.В. Характеристики терморегулирующих плазменно-электролитических покрытий покрытий на алюминиевом сплаве. // В сборнике: Взаимодействие ионов с поверхностью ВИП-2017 Труды XXIII Международной конференции. 2017. С. 209-211.

# Анализ современных средств 3D-моделирования и создания интерактивных моделей для обучения операторов современных производств

Юлдашбаев И.А., Салохиддин У.Г.
Научный руководитель — Кириллин А.В.
МАИ, Москва
gizik-css@yandex.ru

Действующие методы обучения персонала недостаточно эффективными, так как процесс обучения не использует электронных обучающих средств, а обучающиеся руководствуется только лишь инструкциями, изложенными на бумаге. В настоящее время существует множество электронных средств обучения персонала, таких как: моделирующие тренажеры, электронные учебные пособия, интерактивные презентации, но в большинстве своем они содержат достаточного количества знаний для закрепления знаний [1].

Трехмерные модели называют интерактивными в том случае, если они запрограммированы определенным образом реагировать на действия наблюдателя. Интерактивные 3D-технологии эффективно применяются во многих областях современной жизни. Информационные потоки с каждым днем становятся интенсивнее, поэтому информацию следует доносить до пользователя в доступной форме, при этом позволяющей ознакомится с нужной темой достаточно глубоко. Наглядность, информативность и простота использования – это три основных качества современных «умных» информационных систем. ¬

Процесс создания интерактивной трехмерной модели состоит этапов:

1) Подготовка исходных материалов. Этот этап включает в себя сбор или разработку материалов, необходимых для выполнения проекта, а именно – эскизы, чертежи, фотографии, технические требования к окончательному результату. Для создания ролика, то обязательно придумывается и прописывается сценарий, вплоть до описания каждого кадра.

2) Моделирование. На этом этапе создаются геометрические модели. Желательно каждую модель или набор моделей, объединенных по смыслу, создавать в отдельном файле. После нескольких проектов накопится внушительная библиотека моделей, которые можно будет использовать в последующей работе. На этапе моделирования желательно отредактировать текстурные координаты.

3) Текстурирование. На этом этапе поверхностям моделей назначаются растровые или процедурные текстуры, а также свойств материалов. Очень важно позаботиться о возможности быстрого изменения настроек материалов, свести к минимуму применение сложных по структуре материалов.

4) Анимация. На этапе анимирования объектов в сцене желательно избежать ненужных просчетов. К примеру, при создании ролика при фиксированной камере вовсе не нужно анимировать объекты не входящие в кадр, тем самым экономя время при обработке ролика.

5) Экспорт. На этом этапе осуществляется конвертация построенной трехмерной модели в определенный формат, поддерживаемый средством создания интерактивных моделей.

6) Сборка сцены. Сборка сцены – весьма ответственная операция. Необходимо четко структурировать сцену, используя информативные имена для объектов, слоев и материалов. Здесь и пригодится собранная библиотека моделей.

7) Освещение. На этом этапе необходимо решить какие источники света будут использоваться в сцене и произвести их настройку.

В результате построения готовую трехмерную модель можно рассматривать с любого ракурса, получая тем самым полное представление об объекте, а интерактивное

моделирование позволяет воздействовать на объект имитируя реальные условия эксплуатации и увидеть, как поведет себя объект в тех или иных условиях.

Используя пакет универсального моделирования Autodesk 3ds Max в связке со средством разработки трехмерных приложений, позволяет добиться максимальной приближенности 3D-модели к реальным объектам и средствам производства, а использование сценария позволяет соблюсти строгое соответствие всех проводимых операций утвержденной технологической документации.

Список использованных источников

1. Иосифов П.А., Перванюк А.С. Применение Web-ориентированного подхода на основе информационных фрагментов при построении учебно-тренировочных средств. // Автоматизация в промышленности. 2011. № 7. С. 48-52.

# Секция №8.3 Технологические процессы и системы автоматизированного проектирования металлургического производства

## Конструкция гидравлического прессового инструмента

Абдульминов А.А.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Жаров М.В.
МАИ, Москва
abdulminov@yandex.ru

В контейнер встраиваются втулки, является приемником слитка, предварительно нагретого до температуры прессования. Все давление во время прессования воспринимает на себя контейнер. Контейнер перед прессованием необходимо подогреть, для создания термических условий прессования, тем самым резко повышается срок его службы. Для нагрева контейнера применяют электрический нагрев индукторами, встроенными в наружную часть контейнера.

Проектируя конструкцию контейнера гидравлических прессов, предусматривают применение многослойных втулок, запрессованных одна в другую, для создания предварительного натяга и снятия части напряжений с рабочей, внутренней втулки. Контейнер представляет собой массивную стальную поковку. Внутренняя втулка, подвергающаяся большим механическим и особенно термическим воздействиям, изготовлена она из жаропрочной и окалиностойкой стали.

Прессшайба предохраняет пресштемпель от контакта с нагретым слитком, разгружая его от термических воздействий. при больших удельных давлениях, возникающих при прессовании, прессшайба испытывает нагрев только со стороны заготовки.

Пресштемпель служит для передачи давления от главного плунжера пресса на заготовку. Нагрузка, передаваемая пресштемпелем, направлена вдоль оси и вызывает в нём напряжения сжатия, а при большой длине пресштемпеля возможен его продольный изгиб. Кроме того, на торцовой поверхности возникает наклёп, часто из-за этого выходит из строя. Наклёп торцовой части поверхности пресштемпеля при продолжительной работе сопровождается скалыванием граней на ту или иную ширину под углом 450, поэтому пресштемпели часто изготавливают со сменными наконечниками.

Матрицедержатель необходим для того, чтобы закрыть отверстие контейнера и удержать матрицу, для этого изготаливают матрицадержатель в виде обратного конусного гнезда. При изготовлении матрицадержателя необходимо соблюдать строгое совпадение поверхностей замыкающего конуса матрицедержателя и внутренней втулки контейнера для обеспечения плотного замыкания этих деталей; в противном случае возможно вытекание металла через не плотности в конусных частях втулки и матрицедержателя.

Матрица является наиболее ответственной деталью при прессовании, испытывая, при истечении металла, максимальные напряжения. наиболее простую конструкцию матрицы, а именно плоскую матрицу, которая устанавливается в матрицедержатель вместе с подкладкой.

# Компьютерное моделирование литья в формы из холодно-твердеющих смесей (ХТС) отливок из алюминиевых сплавов

Абрамов П.В.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Бережной Д.В.
МАИ, Москва
jakob_mb@mail.ru

Применение метода литья в формы из ХТС позволяет повысить качество и снизить себестоимость отливок, в том числе, за счет увлечения точности размеров, сокращения сроков изготовления форм, низких затрат на оборудование по сравнению с другими методами литья, совместимости смесей для изготовления стержней и форм, снижении трудоемкости обрубки и зачистки литья и возможности регенерации ХТС для повторного использования [1,2].

В тоже время, необходимо отметить, что качество отливок и себестоимость их получения во многом определяются при разработке технологического процесса [3]. Применение компьютерного моделирования литейных процессов позволяет получить параметры технологического процесса и литниково-питающей системы (исполняемых размеров стояка, литникового хода, питателей и прибылей и т.д.), обеспечивающих получение бездефектных отливок с минимальными финансовыми затратами, но только при использовании адекватных компьютерных моделей. Для обеспечения этого в работе проведен анализ особенностей литья отливок из алюминиевых сплавов в формы из ХТС, которые необходимо учитывать при компьютерном моделировании заполнения расплавом полости формы и кристаллизации отливки. Рассмотрено задание необходимых условий при моделировании литья в формы из ХТС (материалов, контактных и граничных условий, параметров расчета) в системе компьютерного моделировании литейных процессов ProCast компании ESI Group.

С помощью разработанной схемы компьютерного моделирования литья в формы из ХТС был проведен качественный и количественный анализ процесса литья отливки «Заслонка» из номенклатуры предприятия «Алюмлит». Проведенное сравнение дефектов полученных при литье данной детали в формы из ХТС в заводских условиях с дефектами, прогнозируемыми компьютерной моделью, показало хорошую адекватность полученной компьютерной модели литья в формы из ХТС отливок из алюминиевых сплавов.

Список использованной литературы

1. Леонов А.А., Дуюнова В.А., Ступак Е.В., Трофимов Н.В. Литье магниевых сплавов в разовые формы, полученные новыми методами // Труды ВИАМ. 2014. №12 Ст. 01

2. Кутовой Н.Л., Браткова Ю.Л. Современные технологии регенерации холоднотвердеющих смесей // Материалы и технологии XXI века: сб. ст. XIV Международ. науч.-техн. конф. Пенза, 2016. 260 с

3. Смыков А. Ф., Моисеев В. С., Бережной Д. В. Системный подход к оптимизационному проектированию технологических процессов литья // Литейщик России. - 2009. - № 6. - С. 40-43.

# Штамповка тонкостенных конических деталей

Антипов А.Н.
Научный руководитель — к.т.н. Нестеренко Е.С.
СНИУ им. С.П. Королёва, Самара
komrad.antipoff2014@yandex.ru

Метод изготовления тонкостенных деталей в форме конуса в штампе с упругим элементом значительно увеличивает степень деформирования и повышает точность изделий [1].

Данная задача решается за счет применения совмещенного процесса обжима и раздачи в штампе с металлическим упругим элементом. Применение двух процессов (обжим и раздача) повышает суммарный коэффициент формоизменения, а применение упругого элемента значительно облегчает деформирование и повышает точность деталей [1].

Упругий металлический элемент может выполняться из ленты, свернутой в конус по спирали. Он может изготавливаться из материала с более низким модулем Юнга и значительно большим, по сравнению с заготовкой, пределом пропорциональности.

Упругие свойства элемента должны быть достаточными, чтобы осуществить процесс формоизменения поковки без остаточной пластической деформации самого элемента.

Совместное деформирование заготовки и элемента, гораздо облегчает процесс формоизменения, из-за устранения касательных напряжений на ее внешней стороне, которые переносятся на поверхность контакта между упругим звеном и матрицей.

Трение, появляющееся под действием силы, между упругим элементом и металлической поковкой, играет важную роль, так как на внешнюю боковую сторону прикладывается равномерное воздействие, которое совпадает с направлением протекания металла, вследствие чего поковка затягивается упругим элементом в зону пластического деформирования, что приводит к предотвращению потери устойчивости заготовки и повышению суммарного коэффициента формоизменения.

В конце формовки детали, деформирование заготовки происходит за счет давления, создаваемого сжатием упругого элемента при воздействии на него фланца пуансона. Происходит калибровка поковки, в результате чего повышается точность готовой детали [2].

Упругие свойства металлического элемента должны быть достаточными для того, чтобы произвести деформацию поковки, без остаточной деформации самого элемента, то есть, необходимые напряжения для формоизменения заготовки должны быть меньше предела упругости самого элемента.

После снятия нагрузки элемент возвращается в начальное положение, а готовая деталь, с помощью упора-выталкивателя, удаляется из зоны пластического деформирования.

Таким образом с помощью данного способа можно изготовить детали с большим углом конусности и высокого качества.

Данный способ может применяться в различны отраслях машиностроения, самолетостроения, ракетостроения. В нефтегазовой, химической и пищевой промышленности. В гидрогазовых системах самолетов, а так же для получения баллонов, обтекателей, корпусных деталей, компенсаторов, тяг управления. В местах трубопроводов, при переходе от большего диаметра к меньшему. Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что данный метод может использоваться в крупносерийном производстве изделий в форме конуса.

Список литературы:

1.Способ штамповки конусных деталей: пат. 1132407 СССР: МПК в 21 22/23, Попов И.П., Чистяков В.П., Маслов В.Д., Топоров Г.А.; 1983

2.Способ получения тонкостенных конических деталей обжимом-раздачей в штампе с упругим элементом / Нестеренко Е.С., Зимарев М.В., Попов И.П. // 2012. - No №7. - С.18-21

## Модуль управления высокоточной системой подачи продукта на упаковочную машину

Артамонова Н.В.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Мамонов С.А.
МАИ, Москва
artamonova98@yandex.ru

Работа упаковочной машины неразрывно связана с оборудованием, осуществляющим подачу заготовок. Ведь точность и время подачи заготовок – это основной показатель хорошего качества упаковки. Кроме того, избежать неполадки в работе и добиться максимального качества можно лишь с помощью просчитанного дозирования.

Рассмотрев принцип работы типовых упаковочных систем, можно определить 3 типичные подсистемы:

- подготовка и протяжка упаковочной пленки;
- подготовка и подача заготовок;
- расфасовка и упаковка заготовок.

Система подготовки и подачи заготовок является наиболее сложной для разработки, так как необходимо синхронизировать несколько конвейеров с упаковочной машиной и разработать алгоритмы коррекции.

В качестве основы для разработки была взята итальянская конвейерная система. В ее состав входит шесть конвейеров: четыре подающих, один синхронизирующий и один фазирующий. Отслеживание положения заготовок на конвейерах производится датчиками, установленными по два на каждый конвейер. Основные недостатки этой системы – сложность конструкции и, как следствие, трудности в обслуживании, а также высокая стоимость и низкая скорость передачи заготовок.

В результате разработки удалось добиться упрощения конструкции, сокращения количества датчиков, уменьшения стоимости. Конвейерная система характеризуется увеличенной скоростью подачи заготовок, что позволяет использовать ее с высокопроизводительными горизонтальными упаковочными машинами. Проведено промышленное испытание, конвейерная система успешно внедрена в производство.

## Влияние фракционного состава быстрозакаленных порошков жаропрочных никелевых сплавов на микроструктуру компактных заготовок

БАсков Ф.А.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Серов М.М.
МАИ, Москва
didi-fedya3@rambler.ru

В результате развития двигателестроения вырос спрос на новые высокоэффективные материалы. Это развитие стимулируется потребностью в повышении термического к.п.д. авиационных газовых турбин. Такими высокоэффективными материалами, которые способные выдержать высокие температуры и обладать требуемыми прочностными свойствами являются жаропрочные изделия на никелевой основе. Наиболее перспективным способом изготовления таких изделий является затвердевание расплава в виде микрослитков с высокими скоростями охлаждения и консолидацией их до компактного изделия.

В данной работе гранулы получили центробежным распылением расплава вращающегося электрода. Способ представляет собой оплавление потоком горячей плазмы кромки вращающегося электрода. Под действием центробежной силы расплав начинаем разлетаться в разные стороны и в свободном полете в среде инертных газов приобретать

сферическую форму. Для последующего анализа полученные порошки рассеяли на три фракции: 40-100; 100-160 и 160-200 мкм.

Компактирование гранул осуществляли горячим изостатическим прессование (ГИП), после чего заготовки подвергались термической обработке (ТО) состоящей из закалки и старения. Структуру полученных заготовок исследовали на электронном (JEOL) и оптическом (Axio Vert.A1) микроскопах. Компактные заготовки обладает практически (99%) беспористой структурой, без каких либо поверхностных дефектов не зависимо от фракционного состава гранул. Структура заготовок представляет собой зернистую структуру. Размер зерен менялся в зависимости от фракции используемых гранул. Заготовки из гранул фракции 40-100 обладают меньшим размером зерна.

Таким образом, из полученных исследований можно сделать вывод, что фракционный состав гранул напрямую влияет на размер зерна. Уменьшение размера зерна приводит к измельчению всех структурных составляющих, таких как карбидные и γ´ фазы. Это в свою очередь приводит к улучшению прочности, пластичности и жаропрочности компактных заготовок.

## Технология изготовления криволинейных длинномерных профилей методом изотермической высокоточной штамповки

Борунова Т.И.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Галкин В.И.
МАИ, Москва
zavarka-tanha@mail.ru

В авиационной технике используются детали различных форм и конфигураций. В частности широко распространены криволинейные длинномерные профили, которые являются частью фюзеляжа самолета. Такие детали сложны в изготовлении, и, чаще всего, их производят с помощью обработки резаньем, что значительно снижает коэффициент использования материала, механические характеристики изделия, повышается трудоемкость изготовления. В связи с вышесказанным необходим поиск альтернативных методов производства подобных изделий. Среди методов обработки металлов давлением одной из предпочтительных может быть технологическая схема, основанная на высокоточной изотермической штамповке.

Главная особенность технологи изготовления деталей методом изотермической штамповки заключается в нагревании инструмента и заготовки до температуры горячего деформирования последней. Такой режим обеспечивает высокие пластические свойства заготовки на протяжении всего процесса деформирования, возможность производства деталей сложной конфигурации, снижение объемов последующей обработки резаньем, повышение механических свойств в изделии и др.

Технология изготовления криволинейных длинномерных профилей методом высокоточной изотермической штамповки может осуществляться двумя способами: штамповка заранее изогнутой заготовки и штамповка совместно с изгибом в штампе. Для осуществления первого способа необходимо в технологический процесс вводить дополнительную операцию гибки, что значительно повышает трудоемкость. При осуществлении второго способа необходимо учитывать, что имеются три варианта расположения заготовки в ручье штампа: у внешнего или внутреннего контура ручья штампа и посередине.

При проведении исследований в CAE-системе рассматривались все три варианта расположения заготовки в полости ручья штампа. В качестве заготовок использовались прутки круглого и прямоугольного сечения.

Проведенное математическое моделирование показало возможность использования в качестве заготовки прутка круглого сечения, однако, данный способ имеет ряд недостатков. Высокие степени деформации и температура теплового разогрева обуславливает сложность в выборе материала, неравномерное распределение деформаций, возможен пережог материала.

При использовании заготовки прямоугольного сечения накопленная степень деформации и относительная деформация распределены однородно по ее длине. Однако, как и в случае с заготовкой круглого сечения, в процессе формоизменения заготовки наблюдаются высокие степени деформаций и температура теплового разогрева. В обоих способах расчеты показывают высокое значение величина потребных усилий.

Для устранения вышеописанных недостатков предложено увеличить количество переходов при штамповке с 1 до 2: выдавливание прямолинейной части профиля и окончательная штамповка. Такая схема производства обеспечивает равномерность заполнением металла полости штампа. Степень деформации составляет не более 60%. Температурные параметры процесса позволяют вести деформацию с максимальными пластическими показателями и не приводят к чрезмерному перегреву поковки.

Таким образом, для производства криволинейных длинномерных профилей сложного сечения рационально использовать схему изотермической штамповки, осуществляемую в два перехода.

## Получение полых отливок из алюминиевых сплавов с заданной толщиной стенок

Босалыго К.А.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Смыков А.Ф.
МАИ, Москва
bosalygo@mail.ru

Для литья пустотелых изделий за счет выжимания жидкого сплава из полости литейной формы требуется знать скорость нарастания твердой корки металла со стороны формы. В результате, удаляя остаток жидкого металла из отливки в фиксированный момент времени, появляется возможность получать полую отливку нужной толщины. Однако, расчетная задача усложняется, если форма не является однослойным и полуограниченным в тепловом отношении телом. При проведении экспериментальных исследований по удалению новым способом остатка расплава из полости песчано-глиняной формы для получения полых отливок столкнулись с проблемой образования механического пригара на поверхности отливки. Для его устранения было принято решение по использованию металлических вставок между расплавом и песчано-глиняной формой. В результате, при повторном эксперименте, получили чистую поверхность отливки, но двухслойную форму. После анализа математической модели по тепловой работе формы пришли к выводу, что для данного случая применима методика [1], разработанная с применением эффективного коэффициента аккумуляции теплоты формы bэф, который позволяет учитывать особенности теплообмена затвердевающей отливки с двухслойной формой. На базе расчетной методики по определению bэф разработана специализированная методика получения отливки с внутренней полостью и заданной толщиной стенки. Для определения теплофизических характеристик лабораторной песчано-глиняной смеси в зависимости от плотности набивки, дополнительно проведена серия экспериментов, по результатам которой построены графические зависимости теплопроводности песчано-глиняной формы используемого состава от плотности набивки.

Разработанная методика проверена экспериментально на цилиндрических полых отливках из сплава АК12ч, а также проанализирована в моделирующей системе ProCast.

Литература
1. Неуструев, А.А., Моисеев В.С. Автоматизированное проектирование технологических процессов литья – М.: МГАТУ, 1994. - 256с.

## Разработка системы управления подачей кислорода для очистки воды

Васильев Д.Д.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Мамонов С.А.
МАИ, Москва
vasili3vdim@yandex.ru

Рассмотрена система управления выполнением традиционной непрерывной обработки сточных вод по схеме оптимального вытеснения.

Анаэробные сточные воды поступают самотеком в секцию аэробной очистки, проходя последовательно через селекторные резервуары Т-1500 А, Т-1600 А, Т-1600В и Т-2400.

Аэрация осуществляется мелкопузырьковыми аэрационными системами. Решетки аэрационных головок равномерно распределены по внутренней поверхности стенок резервуаров Т-1500 А, Т-1600 А/В и Т-2400. Подача воздуха в них осуществляется с помощью воздуходувок В-1601А/В/С/D/E.

Для обеспечения необходимого перемешивания жидкости и ила в резервуарах установлены мешалки.

Системы контроля содержания растворенного кислорода предназначены для поддержания содержания растворенного кислорода в аэробных резервуарах на уровне установленного контрольного значения. Сигналы от датчиков, измеряющих содержание растворенного кислорода, контролируют подачу воздуха нагнетателями в резервуары с помощью регуляторов частоты вращения.

На основании требований технологического процесса была составлена структурная схема системы управления, разработан алгоритм. Для поддержания заданного значения содержания растворенного кислорода в резервуарах использовался ПИД-регулятор.

ПИД-уравнение управляет процессом, посылая сигнал выхода на частотные преобразователи воздуходувок. Чем больше ошибка между уставкой и входной переменной процесса, тем больше сигнал выхода, и наоборот. Дополнительное значение (опережающее или смещение) может быть добавлено к выходу управления, как смещение. Результат ПИД-вычисления (переменная управления) будет направлять переменную процесса, которой управляют, к уставке.

Для расчета регулятора построена математическая модель.

## Исследование информационных и материальных потоков в цехе механической обработки, разработка плана реорганизации цеха с целью его оптимизации

Васимова И.Н.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Жаров М.В.
МАИ, Москва
irina_kvanta@mail.ru

В современной России промышленные предприятия, производящие продукцию в цехах, организация которых не изменялась с советского периода, являются очень распространенным явлением. Оборудование, инструменты и оснастка с течением прогресса изменяются и дополняются, исходя из этого необходимо реструктурировать пространства и расположение цехов. Грамотная реорганизация цеха, с учетом имеющихся на сегодняшний

день ресурсов, позволяет существенно повысить эффективность взаимодействия подразделений, оптимизировать затраты и время на выполнение конкретных операций.

Целью данной работы является разработка плана по реорганизации существующего цеха механической обработки, на предприятии АО «НПП «Квант». Данное предприятие специализируется на выпуске мелких деталей в условиях серийного производства для изготовления автономных фото- и электрохимических источников электропитания, применяемых в космических летательных аппаратах. В рассматриваемом цехе предусмотрены этапы производства 10 изделий со схожими маршрутными картами. В период 2000-2016г. наблюдалось падение эффективности работы цеха, что привело к высоким срокам выполнения и ухудшению качества продукции. Это обусловлено тем, что в указанный период произошёл рост развития технологий, предприятие столкнулось с необходимостью замены оборудования и изменением маршрутных карт, тогда как расположение участков, подсобных помещений и организационная структура работы цехов значительно устарели.

Для реализации поставленной цели были решены следующие задачи: получены сведения о площади производственных и подсобных помещений цеха; получены данные о количестве участков и имеющемся в цехе оборудовании, на основании которых определена фактически-необходимая площадь и выявлены нерационально-используемые площади; проведен анализ загруженности каждого вида оборудования; получены численные данные производительности цеха за рабочую смену, а также время изготовления партий деталей с различными маршрутными картами, с помощью моделирования в программной среде AnyLogic; проведена серия экспериментов в среде AnyLogic, в ходе которых последовательно изменялись и регулировались различные критерии работы цеха; на основании данных экспериментов составлен план реорганизации, включающий в себя корректирование расстановки оборудования, корректирование и улучшение условий труда на рабочем месте, регулирование сроков обработки деталей, оценку обязанностей отдельных работников, внедрение системы оперативной транспортировки заготовок и деталей; выполнен ряд расчётов, пользуясь формулами, стандартами предприятия и ГОСТ. На этапе оптимизации работы цеха были проведены основные расчеты по вычислению необходимого количества оборудования, определению количества станкочасов на годовую программу выпуска, определение общей численности рабочего состава и общей площади необходимых производственных помещений.

Рассматриваемый цех имеет площадь 1317 м2, рассчитан на более 100 единиц оборудования и предусматривает функционирование следующих участков: токарного, прессового, слесарного, фрезерного, сварочного и участка автоматов. Помимо рабочих участков предусмотрены подсобные помещения, такие как архив, складские, ремонтные помещения, отделы комплектации, экономики и ОТК, а также технологическое бюро и кабинет начальника цеха. Общая высота потолков, при наличии технологической антресоли, 5,2 м. Средний коэффициент загрузки оборудования 0,66.

С учётом ассортимента рынка промышленного оборудования, составлен план-предложение по замене устаревшего оборудования на современные станки с числовым программным управлением, что позволит автоматизировать ряд энергоемких процессов, сократить время выполнения операций, количество персонала и потребные производственные площади.

В ходе проведения работы выявлены факторы, оказывающие негативное влияние на работу цеха, составлен план реорганизации, предусматривающий увеличение производительности путём повышения загрузки и снижения простоя оборудования. Эффективность плана заключается в уменьшении финансовых и временных затрат на производственный цикл изделий. Моделирование предлагаемого плана, с учётом необходимой замены оборудования, в среде AnyLogic показало увеличение показателей производительности в 2,5 раза. Освобождение нерационально-используемых площадей даёт возможность установки дополнительных производственных линий.

## Схема штампа для операции гибки V-образных деталей

Волгушев А.А.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Нестеренко Е.С.
СНИУ им. С.П. Королёва, Самара
anton.volgushev@ya.ru

На кафедре Обработки металлов давлением Самарского университета изучается процесс штамповки с использованием упругих свойств штамповой оснастки. В работе представлен процесс гибки V-образной детали с упругим элементом, который позволит уменьшить значение пружинения.

Способ осуществляется следующим способом:

Заготовку закладывают в штамп. Пуансон опускается, заготовка деформируется, но из-за упругого элемента сама заготовка поджимается им, а он, в свою очередь, компенсирует упругие пружинения.

При деформировании заготовки и упругого элемента условия формообразования изменяются из-за ликвидации на её наружной поверхности реактивных касательных напряжений, переносящихся на поверхность контакта между матрицей и упругим элементом.

Из-за сжатия упругого элемента создается давление, которое равномерно распределяется по наружной боковой поверхности детали. При этом происходит калибровка заготовки, что дает повышенную точность готовой детали.

Упругие свойства искомого упругого элемента, выполненного из металла, должны быть достаточными для того, чтобы осуществить процесс деформации заготовки без остаточной деформации самого элемента, то есть, напряжения, возникшие в упругом элементе, должны быть менее предела упругости σ упр.

После снятия нагрузки упругий элемент под действием упругих сил возвращается в начальное положение, а готовая деталь удаляется из зоны деформирования упором-выталкивателем.

Список используемых источников

1. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке [Текст] / В. П. Романовский. - Л.: Машиностроение, 1979. - 520 с.

## Технология литья в формы из ХТС с применением силиконовой модельной оснастки

Галкин К.А., Финогенова Ю.М.
Научный руководитель — к.т.н. Петров И.А.
МАИ, Москва
gualme@rambler.ru

В условиях современного литейного производства часто возникает потребность в изготовлении опытных партий ответственных отливок сложной конфигурации. В литейном производстве для получения отливок из алюминиевых сплавов широко применяют литьё в песчаные формы и в кокиль. Однако эти методы литья для опытных партий ответственных отливок сложной конфигурации не применимы. Наиболее доступным способом производства ответственных отливок сложной конфигурации, является литьё в формы из холодно твердеющей смеси (ХТС).

Примером служит отливка детали «Корпус», изготовленная из алюминиевого сплава АК9ч (АЛ4), представляет собой корпус масленого насоса. Используется в двигателе самолёта. Деталь «Корпус» предназначена для работы в условиях повышенных температур и

под высоким давлением. Отливка имеет сложную конфигурацию. К ней предъявляются высокие требования по точности размеров, герметичности, прочности и другим показателям.

Принципиально возможно получение таких сложных ответственных отливок методом литья в формы из ХТС. Изготовление форм из ХТС по сравнению с изготовлением форм для литье в кокиль – менее трудоемкий процесс. Следовательно изготовления ответственных отливок сложной конфигурации занимает существенно меньше времени и ресурсов.

Был разработан способ получения ответственных отливок со сложными поднутрениями и обратными уклонами по технологии литья в формы из ХТС с применением силиконовой оснастки. Суть разработанной технологии в следующем. Основная часть модельного комплекта изготавливается из модельных материалов. Для получения отверстий, не попадающих в плоскость разъёма, поднутрений и обратных уклонов в форме необходим материал, способный изгибаться без деформации, обладающий при этом достаточной прочностью. Это позволяет извлечь модельную оснастку из литейной формы без деформации самой формы и оснастки, с сохранением размерной точности [1].

В качестве материала формообразующей поверхности модельной оснастки был выбран силикон. Для изготовления силиконовых моделей использовался методом трехмерной печати. В специально изготовленную опоку устанавливается мастер модель, полученная таким образом форма заливается двухкомпонентным силиконовым компаундом. Силиконовая модель устанавливается в модельный комплект оснастки в качестве формообразующей части. Для улучшения извлечения на формообразующую поверхность силиконовой модели наносится специальное разделительное покрытие.

Таким образом при изготовлении опытных партий ответственных отливок сложной конфигурации методом литья формы в ХТС с применение силиконовой модельной оснастки позволяет сократить сроки и затраты на подготовку производства по сравнению с литьем в кокиль, и при этом получить отливки более высокой точности, чем при классическом литье в песчаные формы.

Список литературы:

1. Андронов А.В., Благирев А.В., Петроченков А.О., Финогенова Ю.М. Изготовление точных отливок методом литья в формы из ХТС с применением силиконовой оснастки. Прогрессивные литейные технологии. Труды VIII Международной научно-практической конференции. Под редакцией В.Д. Белова и Н.А. Белова. 2015г., с. 330-333

## Современное направление в машиностроении - высокоскоростная обработка

Геращенков А.А.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Прудников В.А.
МАИ, Москва
oneg.m@yandex.ru

На данный момент в области обработки металлов решаются задачи развития и применения современных методов обработки, которые в первую очередь направлены на повышение рентабельности и эффективности производства, на снижение времени изготовления детали и производственных затрат.

Внедрение новых станков с ЧПУ для высокоскоростной обработки является одним из самых перспективных направлений в машиностроении. При их внедрении целесообразно использовать высокоскоростную фрезерную обработку (ВСО), а так же возможности программирования, а именно, не привнося изменений в режущий инструмент, оснастку, оборудование, достичь улучшения технологии за счет приемов программирования.

Изучая систему автоматизированного проектирования Siemens NX, можно выделить новую стратегию обработки Adaptive Milling в системе автоматизированного

проектирования Siemens NX. Плавное скругление перемещений без резания, шаблон обработки по трохоиде.

Применение перечисленных выше функций позволяет без изменения оборудования, оснастки и режущего инструмента повысить производительность оборудования до 50 %, повысить время жизни инструмента до двух раз.

Сегодня исследователи выделяют следующие преимущества высокоскоростной обработки 1) значительное сокращение основного машинного времени; 2) повышение удельной объемной производительности резания на 30 %; 3) увеличение скорости по- дачи в 5–10 раз; 4) возможное уменьшение силы резания более чем на 30 %; 5) возможность обработки в условиях отсутствия вибраций геометрически сложных деталей; 6) возможность чистовой обработки резанием (качество поверхности почти соответствует качеству шлифования, непрерывная обработка за счет отвода технологического тепла преимущественно через стружку).

Таким образом при грамотной настройке и большой загрузке станков стратегия ВСО способна довольно быстро окупить все затраты.

## Исследование применения карбоната калия как модификатора для силуминов

Гончаров В.В., Федорцов Р.С.
Научный руководитель — к.т.н. Петров И.А.
МАИ, Москва
foxyl1e@outlook.com

Широкое применение в цветной металлургии получили литейные алюминиевые сплавы системы Al-Si – силумины. Силумины обладают наилучшими литейными свойствами и применяются для производства сложных фасонных отливок в авиастроение и автомобилестроение. В связи с возрастающими требованиями к эксплуатационным свойствам изделий из литейных алюминиевых сплавов системы Al-Si, актуальна разработка способов повышения качества фасонных отливок из силуминов.

Известно, что для повышения качества фасонных отливок из силуминов, в том числе повышение механических свойств, необходимо применение модифицирования, т.е. измельчение структуры за счёт введения в расплав малого количества модифицирующих добавок.

На основе теоретического анализа и исследования литературных данных, а также полученных ранее экспериментальных данных [1], в настоящей работе изучена возможность модифицирования сплава АК12 за счёт обработки расплава соединениями поверхностно-активных элементов. В проводимых исследованиях в качестве соединения, с помощью которого в расплав вводится поверхностно-активный элемент, был выбран карбонат калия (углекислый калий).

Расчетное количество исследуемого поверхностно-активного элемента – калия, вводимого в сплав, было выбрано равным 0,1%, 02%, 0,3%, 0,4%, 0,5% от веса плавки.

Анализ результатов механических испытаний сплава АК12 после его обработки карбонатом калия показал, что обработка расплава положительно воздействует на микроструктуру и механические свойства сплава АК12.

Наиболее высокие механические свойства получены при введении в сплав АК12 расчётного количества калия, равного 0,3% и 0,4% с помощью карбоната калия. Анализ микроструктуры показал, что при повышении содержания калия с 0,2% до 0,3% и 0,4% оказывает более сильное модифицирующие воздействие на микроструктуру полученного опытного сплава. Микроструктура в этих сплавах характеризуется значительным измельчением и более равномерным распределением частиц кремния в эвтектике по

площади шлифа, чем микроструктура сплава АК12 при введении расчётного количества калия, равного 0,1% и 0,2%.

Дальнейшее увеличение содержания калия в опытном сплаве до 0,5% приводит к снижению уровня механических свойств, что связано с эффектом перемодифицирования, при котором происходит огрубление кристаллов эвтектического кремния в микроструктуре.

Исследование возможности применения карбоната калия как модификатора для силумина показали, что обработка расплава положительно воздействует на микроструктуру и механические свойства сплава АК12. Необходимо дальнейшее проведение исследований по применению карбоната калия, как модификатора, для разработки и совершенствования технологии модифицирования силуминов.

Литература:

1. Ряховский А.П., Петров И.А., Шляпцева А.Д., Моисеев В.С. Исследование модифицирующего влияния углекислых солей на сплав АК12 // Литейщик России. – 2013 г.- №2 с. 20–22.

## Сравнение механических свойств сплавов МЛ5 и МЛ10 на отдельно отлитых и вырезанных из отливок образцах в зависимости от химического состава, параметров литья и способа термообработки

Гумницкая О.В.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Бобрышев Б.Л.
МАИ, Москва
Busik8371@yandex.ru

В процессе изучения обширного направления "Литейное производство" было отмечено, что во всех сплавах есть определенные пределы по содержанию в себе различных составных частей (компонентов). В данной работе проводится анализ свойств, а именно предела прочности, предела текучести и относительного удлинения материала, приобретаемых сплавами при различных условиях. А этих условий достаточно много и они приводят к разнообразнейшим результатам. Было замечено, что свойства сплава могут отличаться в отдельно отлитых образцах и в вырезанных из отливок образцах при, казалось бы, одном способе литья просто из-за того что составляющие сплава распределены в нем не равномерно. Механические свойства разнятся от способов термообработки и весьма сильно. В этой работе освещены виды термообработки для магниевых сплавов, таких как сплав МЛ5, для него было отобрано три вида – сырой (не обработанный), режим Т4 и режим Т6, и один для сплава МЛ10 – Т6. Показано также что один и тот же сплав при чуть большем или меньшем содержании того или иного компонента тоже меняет свои механические свойства. Рассмотрены два основных параметра литья, то есть, литье в кокиль литье в песчано-глинистую смесь, как еще часто называют данный метод – литье в «землю». По изученным материалам и данным, которые были весьма обширны, по меньшей мере, были изучены показатели двухсот различных плавок, были составлены таблицы трех изучаемых характеристик, а для более наглядной демонстрации и сравнения свойств были построены графики.

# Расчетная оценка температурного поля вкладыша ракетного сопла из капиллярного вольфрама с медью в качестве наполнителя, полученного плазменным напылением

Демин Д.В.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Бабин С.В.
Ступинский филиал МАИ, Ступино
denis_demin_acm_1899@mail.ru

Вкладыш сопла является одним из наиболее теплонапряженных элементов конструкции ракетного двигателя твердого топлива. Решение проблемы тепловой защиты сопла при помощи вкладыша сопла с капиллярной структурой позволяет сделать двигатель более совершенным, повысить надежность двигателя и длительность его работы.

В настоящей работе рассмотрен вопрос тепловой защиты вкладыша путем пористого транспирационного охлаждения медью, кипящей в капиллярах вольфрамовой матрицы соплового вкладыша. Известные материалы, такие как графит, вольфрам-медные псевдосплавы, карбидная керамика обладают рядом недостатков.(газовая эрозия графита, неравномерность распределения меди по псевдосплаву, низкая стойкость к термоудару карбидных материалов). Применение вкладышей с капиллярно-пористой матрицей из вольфрама с капиллярными каналами заданной формы и размером, пропитанными медью. позволяет устранить указанные выше недостатки.

В работе разработана структура капиллярно-пористого вольфрам-медного вкладыша, методы формирования такого изделий путем применения послойного плазменного напыления. Разработана установка для изготовления вкладышей в полуавтоматическом режиме.

В целях теоретического обоснования работоспособности конструкций такого рода проведена расчетная оценка температурного поля вкладыша. Принималось, что вкладыш работает как поглотитель тепла, до тех пор пока температура его поверхности не достигает точки кипения меди. Тогда начинается ее испарение с образованием зоны капиллярно-пористого вольфрама, через который фильтруется парообразная медь. Пар отбирает дополнительное количество тепла от пористого вольфрама, таким образом, еще понижает температуру поверхности стенки. Температура вольфрамовой стенки остается приблизительно равной температуре кипения меди при заданном давлении паров.

Исходные данные для расчета

Температура горячих газов ТГ=3650 К,

Давление горячих газов РГ=40 ат,

Коэффициент теплоотдачи - 2,5 □ 104 Вт/(м2□ град)

Продолжительность нагрева стенки $\tau$ = 80 с,

Пористость П = 0,4

Диаметр критического сечения сопла dкр= 160□10 -3 м

Толщина стенки вкладыша □ = 70□10 -3 м

Теплофизические данные вольфрама и меди имеются в справочной литературе.

Выводы:

Теоретическая оценка температурного поля вкладыша показала, что данная капиллярно-пористая конструкция вкладыша удовлетворяет требованиям, предъявляемым к современным двигателям, после 30 с работы температура остается ниже допустимой, из чего следует, что конструкция остается в рабочем состоянии.

## Способ штамповки деталей с широким фланцем

Дикуша А.А.
Научный руководитель — к.т.н. Нестеренко Е.С.
СНИУ им. С.П. Королёва, Самара
A.Dikush@yandex.ru

В основе штамповки полусферы с широким фланцем лежит штамп для глубокой вытяжки осесимметричных деталей [1]. В штампе используется упругий прижим, позволяющий прижимать фланец заготовки на протяжении всего процесса вытяжки. В конструкции штампа изменена форма пуансона, он имеет требуемый радиус закругления, в месте соприкосновения с заготовкой, добавлена калибровочная матрица, в которую штампуется деталь. Конструкция штампа проста в изготовлении. Разрабатываемый метод позволит получать детали с высоким качество поверхности, за счет калибровочной матрицы в которую отштамповывается деталь, снизит гофрообразование на фланце.

Данная схема штампа реализуется на кривошипных прессах с буферным устройством и кривошипных прессах двойного действия[1].

Схема штампа для глубокой вытяжки осесимметричных деталей применяется, когда разнотолщинность фланца больше 30% [2].

Применение штампа с упругими прижимом и матрицей для глубокой вытяжки осесимметричных деталей позволит получать тонкостенные заготовки $S/D_{заг}<0,01$, улучшит качество поверхности получаемой детали, увеличит коэффициент вытяжки на 15-20%, снизит усилие прижима, которое требуется для ликвидации гофрообразования фланца заготовки [1].

Данный способ можно использовать в машиностроении, в самолетостроении, в ракетостроении и т.д.

Список использованных источников

1. Пат. 2494830 Российская Федерация, B21D22/20. Штамп для глубокой вытяжки осесимметричных деталей [Текст]/ Попов И.П., Нестеренко Е.С., Кузина А.А.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский институт)" (СГАУ) – 2011149621/02; заявл. 06.12.2011; опубл. 10.10.2013, Бюл.№28.

2. Нестеренко Е.С., Кузина А.А.; Вытяжка осесимметричных деталей в штампе с упругими матрицей и прижимом; Заготовительные производства в машиностроении №5, 2011, 28-30с.

## Компьютерный анализ и совершенствование технологии штамповки диска турбины из никелевого сплава

Дятлов А.В.
Научный руководитель — д.т.н. Овчинников А.В.
МАИ, Москва
Lescha.dyatlov@yandex.ru

Долговечность, надежность, и устойчивость работы тяжело нагруженных деталей турбореактивного двигателя – дисков турбины определяется совершенством технологии их производства. Одним из критических недостатков большинства технологий штамповки дисков является неравномерность распределения накопленной деформации по объему поковки. Это объясняется большим отличием формы заготовки и формы поковки. Неравномерность распределения накопленной деформации приводит к неравномерности структуры, в следствие чего наблюдается неравномерность механических свойств по

сечению поковки, а также снижается ресурс поковки. Неравномерное распределение накопленной деформации особо опасно в случае, когда в качестве заготовки была использована литая заготовка, что может грозить нахождением в готовой поковке областей с недеформированной структурой.

В работе исследована возможность повышения равномерности распределения накопленной деформации по объёму поковки путем совершенствования действующей технологии штамповки. Для достижения желаемого распределения накопленной деформации пришлось пойти на увеличение количества технологических операций. В качестве объекта выбрана технология штамповки на гидравлическом прессе диска турбины из никелевого сплава Inconel 718. В качестве инструмента исследования использовали отечественную CAE - систему моделирования процессов пластической деформации QForm.

При моделировании действующей технологии штамповки неравномерность накопленной деформации в пределах контура чистовой детали достигает значительного уровня: в середине диска – область с разбросом 0,02 - 2,1 логарифмической деформации и область с умеренной деформированностью - 1,6 периферии диска. Компьютерный анализ действующей технологии с применением координатной лагранжевой сетки показывает, что середина диска хорошо продеформирована, а верхняя и нижняя части диска слабодеформированные. Формирование областей с низкой накопленной деформацией обусловлено использованием всего одной деформирующей операции. Заготовка перекрывает центральную часть ручья и до середины процесса штамповки происходит интенсивное ее заполнение. В результате металл в этой части практически недеформированный.

Для уменьшения неравномерности накопленной деформации процесс формоизменения произведем в три этапа, осадку и две штамповки. Осадка заключается в формоизменении кованного прутка. В качестве нижнего инструмента используется плоская вставка, в качестве верхнего инструмента используется боек со сферической прожимкой. Осадка и первая штамповка производится до достижения заготовки диаметра необходимого для устойчивой установки заготовки на нижнем инструменте в последующей операции. Перед первой штамповкой заготовка кантуется. В качестве нижнего инструмента для первой штамповки используется нижняя вставка, в качестве верхнего инструмента используется боек со сферической прожимкой. Вторая штамповка ведется до смыкания верхней и нижней вставки.

В результате накопленная деформация в середине диска укладывается в интервал 0,42 – 1,0; в верхней и нижней части обода диска – 1,3; в центре обода – 2,2.

В ходе исследования были испытаны четыре варианта решения проблем, связанных с неравномерностью накопленной деформации. В ходе эксперимента были проверены три вида бойков отличающихся высотой сферической прожимки, а также разные варианты высоты несмыкания верхнего и нижнего инструмента.

На основании результатов проведённых исследований выбран оптимальный вариант, обеспечивающий существенное выравнивание накопленной деформации по объёму обточенной поковки и улучшение прогноза равномерности распределения механических свойств.

# Нанесение покрытий из дефицитных материалов в плазме кольцевого магнетрона

Иванов Н.А., Калинина Д.М., Лабутин А.А.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Лозован А.А.
МАИ, Москва
el8i7presley@gmail.com

В настоящее время использование иридия нашло широкое применение в промышленности. Его стойкость к окислению, разрушению, коррозии и любому химическому воздействию сохраняется как при обычной, так и при повышенной температуре. За счет этих свойств его постоянно применяют в машиностроении и медицине.

Для получения иридиевых покрытий традиционно используют гальваническое осаждение[1]. Однако этот метод имеет ряд недостатков, таких как, высокая пористость, наличие примесей в покрытии, низкая адгезия, ядовитые исходные реагенты.

Наиболее перспективной заменой химического осаждения является метод магнетронного напыления [2]. Полученные пленки обладают плотной микро-(нано-) кристаллической структурой при полном отсутствие капельной фазы и высокой чистотой химического состава. Однако при использовании планарных магнетронов с дисковыми или линейными мишенями недостатком становится низкий коэффициент использования материала мишени, обусловленный относительно небольшой зоной эффективного распыления мишени. Наиболее негативно (с экономической точки зрения) данное обстоятельство сказывается при распылении драгоценных и редких металлов, каковым и является иридий. С целью решения этой проблемы было предложено на экспериментальной установке использовать схему с цилиндрическим магнетроном.

Катод из иридия выполняется в виде кольца, внутри которого по оси располагается деталь. Эффективность электронной ловушки цилиндрического магнетрона позволяет работать при низком диапазоне давлений до 10-4 Торр [3], что весьма важно для получения высококачественных покрытий. При напылении материал катода частично осаждается на деталь в виде покрытия, остальной распыленный материал попадает на противоположную внутреннюю поверхность катода, обеспечивая минимальные потери материала катода-мишени. Для реализации этой схемы спроектирована и изготовлена экспериментальная установка магнетронного напыления. Конструкция установки содержит механизм продольного перемещения покрываемой детали вдоль оси катода, что позволяет напылять покрытия на протяженные детали, а также напылять слоистые покрытия при использовании нескольких магнетронов, установленных последовательно вдоль оси. Магнетронный узел представляет собой кольцевую магнитную систему с водоохлажденым катодом.

В работе представлена перспективная схема установка для напыления дефицитных металлов магнетронным напылением с высоким коэффициентом использования материала мишени. Для напыления использовали кольцевой катод с внутренним диаметром Ø 37мм из высокочистого иридия (Ir 99,9% ГОСТ 12338-81). Отработку режимов проводили путем напыления иридия на цилиндрическую оправку из бронзы диаметром Ø 10 мм и длиной 70 мм. При выборе режима учитывались: скорость напыления, температура оправки, адгезия покрытия к материалу оправки. Напыление иридия проводили при следующих параметрах: то на катоде Iкатода= 1 А, напряжение смещения на подложке Uподл.= 60 В, температура подложки Тподл= 430 °С и скорость передвижения подложки 40 мм/с.

Толщина полученного покрытия из иридия при напылении в течении 60 мин. составила 20 мкм. Исследования микроструктуры образца показали, что сформированное покрытие имеет равномерную толщину, плотную, мелкозернистую структуру без пор, расслоений и трещин.

1. Салтыкова Н.А., Барабошкин В.Е. // Тез. докл. VI Междунар. конф. Производство и эксплуатация изделий из сплавов благородных металлов. – Екатеринбург, 1996. – С. 20.
2. Никитин М.М. Технология и оборудование вакуумного напыления. − М.: Металлургия, 1992.
3. J. A. Thornton and V. L. Hedgcoth, Tubular Hollow Cathode Sputtering onto Substrates of Complex Shape, J. Vac. Sci. Technol. – 1974. − V.12. – pp. 93-97.

## Изучение комплексной обработки магниевых сплавов

Игнатов Д.О.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Моисеев В.С.
МАИ, Москва
idmdmo@gmail.com

Традиционные способы улучшения структуры магниевых сплавов, заключается в обработке жидкого металла магнизитом с последующим рафинированием флюсами, имеет существенные недостатки:

- флюсовая коррозия;
- не достигается эффективная очистка расплава от неметаллических примесей;
- неспособность рафинировать магниевые сплавы от металлических примесей;
- повышенная токсичность флюсов из-за большого содержания в них фтористых солей [1].

В настоящей работе изучалось влияние обработки жидкого металла бескислородными углеродсодержащими газами в чистом виде, или в смеси с инертными газами.

Показано, что прямое введение углерода из газовой фазы существенно повышает уровень механических свойств на 15 ÷ 18 %, полностью исключает флюсовую коррозию и значительно улучшает условия труда на плавильном участке.

Работа выполнялась в лаборатории кафедры «Т и САПР МП» на специальном экспериментальном оборудовании. Для проверки механических свойств описывались стандартные образцы, изготавливаемые в песчаные формы (ХТС – Resol –$CO_2$). Термообработку образцов проводили по режиму Т4 и Т6.

С помощью разрывной машине модели Instron 5982 определяли пределы прочности и текучести образцов.

Микроструктура изготовленных шлифов анализировали с помощью микроскопа Carl Zeiss марки Imager.Z2m AXIO с увеличением (x200).

Список литературы:

1 - Производство отливок из сплавов цветных металлов: Учебник/ А. В. Курдюмов.; Под общ. Ред. В. Д. Белова.-М.: Металлургия, 2011.-615 с.: ил. – (Технология литейного производства).

## Автоматизация технологической подготовки изготовления компонента эндопротеза тазобедренного сустава

Кабанов Б.И.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Поляков О.А.
Ступинский филиал МАИ, Ступино
boris.kabanov.atp@yandex.ru

Эндопротезирование сустава – современный, наиболее эффективный метод восстановления подвижности сустава путем полной или частичной его замены искусственными компонентами. Разработка и производство высококачественных импортозамещающих имплантатов, предназначенных для временного или постоянного

функционирования в организме человека при лечении травм и заболеваний опорно-двигательного аппарата и других систем организма, является важной технической, экономической и социальной задачей.

Целью работы являлась разработка технологии обработки резанием, с широким использованием САПР, проксимального компонента тазобедренного эндопротеза из титанового сплава ВТ6, конструкция которого была разработана в ЗАО «Имплант МТ».

Заготовка для производства имплантата была получена методом гидроабразивной резки из горячекатаной плиты. Контур заготовки повторял контур готового изделия, с припусками на обработку резанием, и с добавлением технологических бобышек для крепления в технологической оснастке. Технология была разработана под имеющиеся на базе филиала оборудование с ЧПУ: токарный станок 16А20, стойка управления Siemens SINUMERIK; фрезерный MCV-1020A, стойка Fanuc. Построение ассоциативных цифровых прототипов системы «заготовка/изделие–оснастка/инструмент» производилось при помощи САПР-приложения Autodesk Inventor Pro HSM (v. 2018) - программный продукт компании Autodesk, содержащий профессиональные инструменты для машиностроительного 3D-проектирования, а также создания конструкторской, технологической и нормативной документаций.

По чертежу изделия была построена 3D-модель. При построении технологии и для составления управляющей программы была смоделирована технологическая оснастка в том минимуме, чтобы гарантировать корректную генерацию кода. После этого в CAM-модуле Inventor HSM была сделана соответствующая настройка, чтобы указать программе, что в сборке является заготовкой, что моделью, что оснасткой.

Для корректного выбора режимов резания, материала и геометрии пластин были использованы рекомендации по обработке титана и титановых сплавов для токарного и фрезерного инструмента компании SANDVIK Coromant, разрабатывающей комплексные решения для обработки деталей, применяемых в аэрокосмической промышленности. Для генерации кода был выбран необходимый инструмент и соответствующие операции.

Самыми продолжительными этапами обработки оказались адаптивные фрезерные операции. Высокая сложность и количество траекторий в итоге формируют большое количество кадров, просчитать которые вручную было бы очень затруднительной и монотонной задачей, открывающей безграничные пространства для ошибок в случае работы над ней человеком. CAM-модуль предусматривает симуляцию программируемых операций. С визуализацией можно наглядно проанализировать весь процесс обработки заготовки на предмет оптимальности, корректности траекторий, увидеть конечный результат и оценить статистику по итогам окончания всех операций: общее время обработки - 8 ч. 27 мин. 42 сек.; количество позиций используемого инструмента -14; КИМ – 45%; общая дистанция обработки - 77,95 м; общее количество кадров управляющих программ - 242234.

## Сравнение методов получения тонкостенных оболочечных конструкций из композиционных материалов

Калинина Д.М., Ленковец А.С., Иванов Н.А.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Лозован А.А.
МАИ, Москва
kalinina365975@gmail.com

Для улучшения характеристик современных космических и летательных аппаратов требуется применение новых композиционных материалов. Как правило, на свойства композиционных материалов и полученных из них изделий основное влияние оказывает технология их получения. В настоящее время методы физического и химического осаждения активно используются для придания необходимых свойств изделию за счет нанесения

покрытия с заданными свойствами. В последние время в литературе [1-4] все чаще встречаются данные о получении изделий, в частности оболочечных конструкций, методами нанесения покрытий. Этот интерес объясняется высокой перспективностью, поскольку методы нанесения покрытия позволяют получать тонкостенные оболочечные конструкции с внутренним защитным покрытием, а также эти методы позволяют расширить спектр используемых материалов.

Способы получения оболочечных конструкций можно разделить на две основные группы, классифицирующийся по методу формирования защитного покрытия и силового каркаса. Первая группа — это методики получения оболочных конструкций физическим осаждением покрытий. К ним относится вакуумно-дуговые, магнетронные и гибридные методы напыления. Получение тонкостенных оболочечных конструкций вакуумно-дуговым и магнетронным методом напыления заключается в изготовлении технологической оправки, на которую первым слоем наносится защитное покрытие с последующим нанесением силового каркаса. Гибридные методы получения тонкостенных оболочечных конструкций отличаются тем, что силовой каркас и защитное покрытие наносятся различными методами напыления. Например, может наносится силовой каркас, который после подвергается химикотермической обработке для формирования защитного покрытия, или же защитное покрытие наносится методом магнетронного напыления, а уже вакуумно-дуговым формироваться силовой каркас. Вторая группа — это методы химического осаждения покрытий. К ним относятся осаждение из газовой фазы и электрохимическое осаждение. Получение тонкостенных оболочечных конструкций этими методами заключается в изготовлении технологической оправки с последующим нанесением защитного покрытия и силового корпуса.

В данной работе проведен сравнительный анализ методов получения тонкостенных оболочечных конструкций, который показал, что выбор метода во многом зависит от материала защитного покрытия. Для металлических защитных покрытий таких как Ir, Ta и др. наиболее подходящими являются методы магнетронного напыления, осаждение из газовой фазы и электрохимическое осаждения. Для получения керамических защитных покрытий таких как $ZrO_2$, $HfO_2$, $MoSi_2$ и др. наиболее подходящими методами являются методы магнетронного напыления, гибридные методы и осаждение из газовой фазы.

Список литературы

1. Ленковец А.С., Моргунов С.В. Получение слоистых металлических композиционных материалов на основе сталей методом ионно-плазменного напыления//Перспективные материалы. – 2011. – В. 11. – С. 370-372.

2. Лозован А.А., Ленковец А.С., Щитов Н.Н., Моргунов С.В. Ионно-плазменное оборудование для формирования наноструктурных упорядоченных покрытий в машиностроении и инструментальной промышленности//Технология машиностроения. – 2012. –№8. – С. 20-23.

3. Патент США № 4917968, Tuffias Robert H., Harding John, Kaplan Richard

Композиция, устойчивая к высокотемпературной коррозии. High temperature corrosion resistant composite structure.

4. Молчанов А.М., Фазлутдинов К.К., Минченко Л.М., Исаков А.В., Зайков, Ю.П. Изучение влияния кислорода в расплавленном электролите $CsCl$-$Cs_2ReCl_6$ на текстуру и морфологию рениевых покрытий // Вестник КазТУ, 2012, Т.15, #16, с 78-81.

# Определение наиболее совершенной технологии изготовления горячей штамповкой оребренных деталей с тонким полотном из легких сплавов с помощью программного продукта QForm

Киньзякаева Р.А.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Петров А.П.
МАИ, Москва
rina.kinzyakaeva.94@mail.ru

В обработке металлов давлением широко распространены штампованные поковки деталей из легких сплавов с ребрами жесткости и тонким полотном. Производство деталей такой конфигурации сопровождается появлением дефектов, которые ухудшают макроструктуру изделия. При штамповке могут возникнуть складки и зажимы, прострелы и поднутрения у основания ребер, незаполнение ребер и недоштамповка полотна.

Основной причиной формирования дефектов является сложный характер течения металла при штамповке, который зависит от выбранного кузнечно-штамповочного оборудования. Поэтому определение рационального способа штамповки, позволяющего получать бездефектные ребристые поковки из легких сплавов с тонким полотном, является актуальной задачей обработки металлов давлением.

Деталью – представителем, имеющим относительно невысокую стенку, тонкое полотно в основании, усиленное ребром жесткости, для которой определяется наиболее совершенный технологический процесс в настоящей работе, является «Кронштейн» из алюминиевого сплава АК6.

Штамповка поковок такого типа осложняется быстрым остыванием металла, высокими удельными усилиями и динамичностью нагружения оборудования. Все это отрицательно сказывается на стойкости штампов и работоспособности оборудования. Поэтому прежде чем приступить к составлению технологического процесса получения детали, следует определиться с деформирующим оборудованием. Так проанализированы способы изготовления детали на кривошипном горячештамповочном прессе, на высокоскоростном молоте и в условиях изотермической штамповки, для каждого способа спроектирована поковка и сконструирована гравюра инструмента.

С целью оценки целесообразности штамповки детали на приведенном выше оборудовании и для выявления возможных дефектов проведено моделирование процесса получения детали в программном комплексе QForm. Программа QForm дает возможность в динамике рассмотреть заполнение и формообразование тонких полотен и ребра в детали.

В результате проведенного моделирования формообразования поковки «кронштейна» были получены картины распределения степени деформации и напряжения в материале поковки, позволяющие выявить наиболее сложные участки ее оформления.

Путем анализа результатов моделирования формообразования поковки, установлено, что наиболее перспективным способом изготовления таких деталей является высокоскоростная штамповка в закрытом штампе в разъемной трехсекционной матрице. При этом способе штамповки достигается полное оформление поковки и отмечено благоприятное формирование текстуры материала.

Для этого способа разработан технологический процесс и спроектирована штамповая оснастка.

# Сравнение механизмов фильтрационного рафинирования магниевых сплавах

Кипин И.А., Бобкова А.В., Бородулин П.О.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Моисеев В.С.
МАИ, Москва
smallville.hi@mail.ru

Фильтрование жидких расплавов является одним из важнейших технологических инструментов гарантированного получения высококачественного литья и снижения трудоемкости их изготовления. У фильтрованного металла заметно стабилизируются прочностные показатели и существенно возрастают пластические свойства. Но особенно эффективно фильтрование снижает дефектность отливок по шлаковым и песчаным включениям, скоплениям неметаллических включений. Достоинства фильтрования жидкого расплава обусловили широкое применение этого способа рафинирования расплава при производстве фасонного литья.

В настоящем исследовании проводилась оценка влияния замены фильтрующего элемента (магнезита) литниково - питающей системы при заливке образцов - свидетелей и сравнения технологических и механических свойств.

Исследования проводились на магниевом сплаве МЛ5 системы Mg - Al - Zn. Широко использующегося для изготовления отливок определенного типа, к которым относятся, тонкостенные корпуса, а также отливки для обеспечения силовой связи отдельных элементов ракет.

Приготовление расплава проводилось по отработанному и утвержденному технологическому процессу на производстве АО"ММЗ"АВАНГАРД".

Согласно производственной инструкции заливка расплава проводится с использованием кускового магнезита в литниковой чаше.

Однако возможность замены магнезита на сетчатые фильтры была обусловлена тем, что фильтры обеспечивают комплексную очистку расплава от неметаллических фаз. Прежде всего, на фильтре задерживаются неметаллические включения, которые присутствуют в жидком металле. Также на поверхности пор фильтра осаждается неметаллическая фаза, которая потенциально готова выделиться, но еще не выделилась по кинетическим условиям.

1. На первом этапе работ применялись фильтры различные друг от друга по толщине. В результате чего подбиралось оптимальное соотношение по технологическим и механическим свойствам от толщины фильтра.
2. На втором этапе сравнивались технологические и механические свойства образцов залитых при использовании магнезита и фильтров. Экспериментальные образцы подвергали термообработке по режимам Т4 и Т6.

По результатам проведенных исследований были сделаны следующие выводы:

1. Сетчатые фильтры справляются со своей основной задачей по улавливанию шлаковых частиц и неметаллических включений лучше по сравнению с магнезитом.
2. Однако незначительно уступают по механическим свойствам образцам, залитым с помощью магнезита (на 5% по прочности и 3% по пластичности) сохраняя при этом технологические свойства на том же уровне.

## Определение сопротивления деформации металлов на пластометре высокого давления

Комаров Р.С.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Федоров А.А.
МАИ, Москва
Rooney-090@rambler.ru

В систему уравнений описывающих математические модели процессов пластического формоизменения входят реологические уравнения, связывающие сопротивление деформации с температурой, степенью деформации, скоростью деформации и предельную степень деформации до разрушения с температурой, степенью деформации, скоростью деформации и показателем напряженного состояния.

От качества этих уравнений зависит степень универсальности математических моделей. Они должны обеспечивать адекватность, точность и экономичность.

Применяемые в настоящее время пластометры позволяют определять сопротивление деформации и предельную степень деформации до разрушения в широком диапазоне скоростей деформаций при заданном развитии скорости деформации во времени, воспроизводя развитие температурно-деформационных режимов промышленных процессов формоизменения. Однако, это в ограниченной степени относится к показателю напряженного состояния. Как видно из уравнений, показатель напряженного состояния, не влияя на сопротивление деформации, значительно изменяет предельную степень деформации до разрушения. Этот факт и послужил основой для создания целой серии устройств, реализованных в виде пластометров высокого давления.

Изучая на таких пластометрах сопротивление деформации для целого ряда металлов и сплавов, нам удалось достичь высоких однородных деформаций при испытаниях на сжатие (до 70 – 75 %), что позволило определять простым экспериментом сопротивление деформации в практически важном диапазоне значений. Достаточно зафиксировать текущее значение усилия сжатия и текущее значение деформации образца.

Построены объемные диаграммы сопротивления деформации для сплавов АМг6, ВТ6с, ЖС6-КП в диапазоне их горячей обработки давлением. Диаграммы представлены так же в виде уравнений, которые используются в составе математических моделей процессов формоизменения.

## Исследование покрытий CrAlNiY напыленных магнетронным распылением одноэлементных мишеней

Кубатина Е.П.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Лозован А.А.
МАИ, Москва
79687098854@yandex.ru

Для улучшения характеристик современных летательных аппаратов требуется разработка новых типов покрытий. Перспективным объектом исследований в настоящее время являются покрытия из многокомпонентных сплавов, в том числе – высокоэнтропийных сплавов, число элементов в которых находится в интервале – 5-12. Для создания подобных покрытий применяются различные методы вакуумного напыления.

Широкое применение для нанесения указанных покрытий получили методы магнетронного распыления. При этом формирование покрытий на подложке происходит как распылением многоэлементных мишеней, полученных методами порошковой металлургии, так и одноэлементных мишеней магнетронов. В данной работе для напыления покрытия

CrAlNiY применили второй вариант, использовав многокатодную установку магнетронного распыления.

Во всех экспериментах в качестве подложек использовали разрезанные на 4 части диски из сплава ниобия НБ5ВМЦ диаметром 40 мм и толщиной 2 мм. Образцы-свидетели изготавливали из стали SUS 304 толщиной 0,8 мм виде пластин 8 × 8 мм. Поверхность ниобиевых подложек полировали шкуркой, последовательно меняя ее зернистость: 120, 300, 600,1000 и 2500, а затем алмазной пастой, нанесенной на войлок, до шероховатости порядка Ra=2,5 мкм.

Морфологию подложек из ниобиевого сплава и напыленных покрытий исследовали бесконтактным профилометром MicroXAM-100 (KLA-Tencor, Inc.). Подложки из SUS 304 использовали в состоянии поставки. Подложки перед установкой в камеру напыления очищали стандартными методами, включающими мойку в ультразвуковой ванне и сушку.

Откачку рабочей камеры с загруженными образцами проводили до остаточного давления (2 – 3)×10-6 Напыление проводилось 4-мя магнетронами (М1 – никель, М2 – алюминий, М3 – иттрий, М4 – хром) при включенном ионном источнике при давлении 1×10-3 мм рт. ст. в течении 60 и 120 минут. Скорость вращения образца 45 об/мин., используя охлаждение ловушки диффузионного насоса жидким азотом.

Эксперименты проводили как с нагревом подложек до температуры 900 °С, так и без него. Очистку поверхности подложек ионным источником проводили при давлении 1×10-3 мм рт. ст. в течении 10 минут.

При анализе напыленных покрытий установлено, что структуры покрытий не отличаются для подложек из ниобия и железа. Без нагрева покрытия характеризуются текстурой (111) параллельно подложке, о чем свидетельствует значительно более высокая интенсивность рефлексов (111) по сравнению с (200). Для покрытий с нагревом их интенсивности сопоставимы, что соответствует соотношению интенсивностей этих рефлексов для бестекстурного состояния. Рефлексы покрытия без нагрева характеризуются большей шириной рефлексов, что свидетельствует о большей дисперсности микроструктуры.

В итоге, покрытия, полученные с нагревом, характеризуются более крупным зерном и отсутствием кристаллографической текстуры. Покрытия без нагрева более дисперсны.

Исследование микроструктуры и химического анализа образцов системы Nb-Ta проводилось на сканирующем электронном микроскопе LEO-430i с рентгеновским микроанализатором OXFORD INSTRUMENTS с энергодисперсионным детектором LINK Isis. Изображения получены во вторичных электронах при ускоряющем напряжении 20 кВ.

Локальный рентгеноспектральный анализ проводился по точкам (разрешение ~1мкм2). Полученные спектры показывают, что никель из состава многокомпонентного связующего слоя в значительной мере глубоко диффундировал в подложку.

## Разработка критериального подхода на принципах бережливого производства для построения имитационных моделей производственных процессов

Кузина С.М.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Галкин В.И.
МАИ, Москва
bart_spa@mail.ru

В данной работе представлена методика разработки имитационной модели производственного предприятия, основанная на некоторых принципах концепции бережливого производства. Основная модель производственного процесса выполнена с

помощью дискретно-событийного подхода к имитационному моделированию в виде системы массового обслуживания.

В модель включены инструменты, позволяющие сократить потери, вызванные простоем оборудования, его низкой загрузкой, перенасыщением склада материалами и комплектующими изделиями, длительным ожиданием продукции незавершенного производства на различных этапах. Параметры производства, влияющие на основные показатели потерь, определены с помощью критериального подхода. Он представлен в виде совокупности целевых функций, выраженных критериальными выражениями, основанными на принципах концепции бережливого производства.

Первое критериальное выражение позволяет оптимизировать объем запасов комплектующих на складе. Разработана система управления ресурсами на основе ПИ-регулятора (с пропорционально-интегральным законом управления), выполненного с помощью системно-динамического подхода. Данный подход кардинально отличается от дискретно-событийного, с помощью которого выстроены все основные процессы. Математическая модель ПИ-регулятора описывается двумя дифференциальными и одним алгебраическим уравнением. Критерий позволяет спрогнозировать оптимальные размеры заказов для разных объемов производства и в короткие сроки оптимизировать объем запасов на складе.

Второе критериальное выражение направлено на минимизацию времени ожидания продукции незавершенного производства. Анализ ожидания продукции производится с помощью объекта сбора статистической информации. Построен оптимизационный эксперимент на базе разработанной имитационной модели, позволяющий определить оптимальный размер партии заготовок, помещаемых на термическую обработку, и оптимальное количество рабочих мест на последующем этапе производства.

Третье критериальное выражение связано с эффективностью использования производственных мощностей. Разработанная имитационная модель решена как оптимизационная задача с поиском максимума критерия. Проведен эксперимент в системе имитационного моделирования с целевой функцией определения оптимального числа оборудования при различных входных параметрах объемов производства нескольких типов продукции. Полученные результаты обработаны по методике планирования эксперимента для получения функциональной зависимости параметра эффективности производства от количества оборудования и объема производства.

Совокупность сложных взаимосвязанных производственных процессов требует применения особых систем принятия управленческих решений. Базой для таких систем может служить имитационное моделирование. Особенно это характерно для новых проектируемых предприятий, когда из-за отсутствия собранной статистики, отсутствует достаточное количество необходимых данных. Применение системы критериальных выражений позволяет моделировать процесс сокращения основных видов потерь, определенных в концепции бережливого производства.

## Исследование комбинированных литейных форм по выплавляемым моделям на основе кремнезольного связующего Армосил АМ

Марчук О.А., Козлов В.В.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Варфоломеев М.С.
МАИ, Москва
oksyusya09.09@mail.ru

Метод литья по выплавляемым моделям, благодаря преимуществам по сравнению с другими способами изготовления отливок, получил широкое распространение в различных отраслях промышленности.

Самым распространенным в качестве связующего материала при изготовлении керамических форм используется гидролизованный этилсиликат, а исходным продуктом служит этилсиликат. Это связующее обладает существенными недостатками. К важнейшему из них относится необходимость проведения операции гидролиза, делающая процесс пожароопасным.

В зарубежной технологии получения литых заготовок рекомендуется керамические формы изготавливать, используя в качестве связующего материала золи кремнезема. Кремнезоль является готовым связующим. В нем в качестве растворителя используется вода, поэтому оно пожаро- и взрывобезопасно.

В работе были проведены исследования процессов изготовления и свойств комбинированных керамических литейных форм на основе коллоидального кремнезема Армосил АМ, разработанного в ООО "НТЦ "КОМПАС". Для изготовления первых двух лицевых слоев в качестве формовочного материала использовали электрокорунд, обеспечивающий высокую огнеупорность и химическую стойкость к заливаемому расплаву. Последующие слои наносили с применением суспензий на основе более дешевого материала маршалита и кристаллического кварца.

Применение в производстве высококачественного литья по выплавляемым моделям водного связующего марки Армосил АМ, в сравнении с процессом производства на основе этилсиликата, допускает снижение производственных затрат за счёт уменьшения себестоимости готового изделия, также не оказывает негативного влияния на окружающую природу и обеспечивает пожаробезопасность технологического процесса. Суспензии на его основе имеют длительный период устойчивости, стабильны по своим свойствам и не требуют никаких дополнительных операций по приготовлению. Использование в приготовлении суспензии таких компонентов, как Армосил АМ и электрокорунд для формирования первых двух слоев позволяет достичь наилучшей кроющей способности, что воздействует на качество поверхности отливок. Высочайшая твёрдость электрокорунда позволяет при помощи струйной очистки снять сильнейшие загрязнения с поверхности, затрачивая минимальное количество времени. Для качества керамических форм и для скорости их производства являются определяющими условия сушки. Процесс затвердевания состоит исключительно в удалении воды из слоёв покрытия, не наблюдается «пересушивание» оболочки, что исключает образование трещин при длительном хранении модельных блоков.

Проведенные исследования позволили установить возможность изготовления комбинированных литейных форм в ЛВМ, что позволяет обоснованно применять эти связующие для формирования первых слоев оболочковых форм для литья заготовок ответственного назначения.

## Определение способа и изучение влияния геометрических параметров исходной заготовки на процесс окончательного формообразования методом ВСШ

Мацокин А.С.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Соколов А.В.
МАИ, Москва
antonmatsokin@gmail.com

Изделие, рассматриваемое в настоящей работе, а именно «рабочее колесо с радиальными лопатками» — представляет из себя симметричную фигуру с элементарным углом поворота оси симметрии 72°, равнорасположенные лопатки которой имеют постоянную толщину 3,2 мм и плоскую поверхность. Метод получения при помощи высокоскоростной штамповки (ВСШ) такого рода изделий позволяет получить: высокий

уровень механических свойств и равномерность их по направлениям и сечениям заготовки, а также высокую точность получаемой штамповки — что является неоспоримым преимуществом относительно любых других способов получения.

Актуальность заключается в определении оптимальных геометрических параметров заготовки для обеспечения оптимизации технологического процесса, путём уменьшения различного рода объёма обработки в процессе получения и энергосиловых параметров, тем самым увеличивая показатель коэффициента использования металла (КИМ), а также эксплуатационные характеристики оборудования и инструмента. Отсюда возникает вопрос способа изучения такого рода процесса.

Наиболее оптимальным способом является компьютерное моделирование, которое заключается в численном методе описания модели через дифференциальные уравнения, позволяющий рассмотреть процесс формоизменения на каждом его этапе, тем самым определить распределение температур и напряженно-деформированное состояние. Отсюда возникает вопрос о постановке наилучшего соответствия модели реологических свойств.

Самыми распространёнными методами решения такого рода задач являются: метод конечных элементов (МКЭ) и метод конечных объёмов (МКО). Сравнительный расчёт окончательной формообразующей операции методом ВСШ показал наилучшее соответствие реологических свойств у МКО, что показывают полученные результаты, где у МКЭ имеются чрезмерно высокие показатели напряжённо-деформированного состояния не имеющие ничего общего с действительностью. Такая разность результатов объясняется тем, что в процессе чрезмерного перестроения сетки МКЭ, существенно падает точность, в отличии от МКО, где элементы не деформируются вместе с материалом. Также, в пользу этого метода есть одно неоспоримое преимущество в виде решения проблемы массопереноса, что является критическим вопросом при ВСШ.

В работе используется конусная форма заготовки, для которой необходимо определить оптимальные её параметры. Отсюда, при помощи перечня значений угла конуса и диаметра цилиндрической части было проведено моделирование получения изделия для каждого варианта. Анализ результатов для рассматриваемого изделия показал оптимальную форму заготовки, при которой имеется наибольшая площадь сопряжения с полостью матрицы, а также наибольший порог вхождения, характеризующийся углом конусной заготовки. Отсюда дальнейшее изменение угла или диаметра приведёт к увеличению работы деформации, получению дефектов, искажений и как следствие уменьшение показателя КИМ, ухудшение эксплуатационных характеристик инструмента.

Применённый МКО при моделировании процесса окончательного формоизменения методом ВСШ, позволил точно отследить изменение тех или иных параметров заготовки, что дало возможность составить рекомендации к определению их оптимальных значений. Полученные значения плотности материала в ходе моделирования ВСШ, позволили определить дополнительный объём, который также необходимо учитывать при определении параметров заготовки, чего нельзя получить при МКЭ, что привело бы к дополнительной работе уже в ходе реальной отладки технологического процесса.

Список литературы:

1. Согришин Ю. П., Гришин Л. Г., Воробьев В. М. Штамповка на высокоскоростных молотах. М., "Машиностроение", 1978.

2. Воробьев В. М. Основы теории и реализация технологических решений процессов выдавливания металлов в многоканальных штампах. Москва, 2012.

# Выбор способа сварки изделий, полученных методом селективного лазерного плавления

Мешков Д.А.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Конкевич В.Ю.
МАИ, Москва
denmesh05@gmail.com

Работа посвящена рассмотрению перспективных технологических решений в области аддитивного производства алюминиевых сплавов системы Al-Mg-Переходные металлы. Основное внимание уделяется процессу формирования деталей и последующей свариваемости изделий, выращенных в 3D – принтере по технологии селективного лазерного плавления (SLM).

Основными причинами перехода производства деталей авиационно-космического назначения с традиционных на аддитивные технологии являются:

-перспектива сокращения затрат на изготовления одного изделия за счет снижения трудоемкости;

-уменьшение массы при оптимизации топологии выращенных деталей.

На сегодняшний день, помимо проблем с поиском наиболее оптимального материала для тех или иных условий, возникает ограничение по габаритам выращиваемых изделий. Требуется прийти к компромиссу в выборе объема камеры принтера. Чтобы не увеличивать объем камеры для печати или не покупать большего размера принтер возникает необходимость в неразъёмном соединении частей детали – сварке.

Особенность микроструктуры выращенных деталей заставляет минимизировать погонную энергию при сварке для формирования структуры пересыщенного твердого раствора переходных металлов в алюминии и для снижения вероятностей порообразования. Наиболее перспективные виды сварки в данном случае:

-лазерная;

-электронно-лучевая;

-сварка трением с перемешиванием.

Сварка трением с перемешиванием (СТП) позитивно отличается от термических способов по таким параметрам, как:

-отсутствие жидкой фазы;

-отсутствие необходимости использования защитной среды;

- отсутствие присадочного материала.

Из отрицательных характеристик, свойственных СТП необходимо отметить требование к жесткому закреплению свариваемых кромок и. как следствие, необходимость в дорогостоящей оснастке сложной конструкции.

Применительно к процессу соединения деталей, полученных по технологии SLM, необходимо отметить строгие требования к отсутствию пор в 3D деталях и, соответственно, в сварных соединениях СТП. Образование цепочек пор по границе зон термомеханического и термического влияния могут существенно ослабить соединение.

В целом, проведенный теоретический анализ и экспериментальные данные позволяют прийти к выводу о возможностях достижения равнопрочных сварных конструкций из 3D деталей, полученных методом SLM.

# Металлургические аспекты в технологии создания алюминиевых конструкций бионического дизайна

Монастырских М.С., Мешков Д.А
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Конкевич В.Ю.
МАИ, Москва
maksim.monastyrskikh@gmail.com

Главная задача бионического дизайна — снижение веса объекта при сохранении или увеличении исходной прочности конструкции – прототипа. Конструкции бионического дизайна можно считать одним из наиболее перспективных направлений создания будущих изделий самолетостроения. При создании конструкций бионического дизайна необходимо решить две главные проблемы:

- конструкционную (разработка программного обеспечения и конструирование бионической конструкции);
- технологическую (выбор материала, решение задач технологии аддитивного производства 3D деталей, проблем сварки и термообработки пространственной конструкции из 3D деталей между создания).

В данной работе рассматривались ряд вопросов металлургии и технологии создания бионических конструкций:

1. Выбор материала.

Выбор алюминиевого сплава для создания бионических конструкций должен производиться с учетом комплекса технологических факторов.

-Высокопрочные термически неупрочняемые сплавы типа В96 в условиях аддитивного производства очень склонны к образованию горячих трещин. Особенности конструкции затрудняют проведение закалки. Конструкция будет склонна к коррозии под напряжением;

-3D детали из сплава AlSi10Mg, при нагреве для снятия напряжений, разупрочняются, но используя данный сплав можно добиться уровня прочности до 350МПа;

- наиболее перспективны с точки зрения достижения высокой прочности - 450-550 МПа, сплавы системы Al-Mg-Переходные металлы.

2. Выбор способа и режимов аддитивной технологии, которые должны решить проблема пористости, трещинообразования.

3. Свариваемость отдельных 3D деталей в пространственную конструкцию:

- лазерная сварка 3D деталей с использованием высоколегированной сварочной проволоки:
- сварка трением с перемешиванием 3D деталей, при этом необходимо обеспечить минимальную пористость исходных деталей, так как уплотнение зоны шва приводит к формированию в границе зоны термомеханического и термического влияния цепочки пор, которая может критически ослабить соединение.

4. Выбор режима термообработки обеспечивающего снятие напряжений и упрочнение конструкции

Создание алюминиевых конструкций бионического дизайна позволит более чем в 2 раза уменьшить вес конструкций-прототипов.

# Использование порошковых припоев в виде лент на полимерных связующих для пайки узлов ГТД

Морозов В.А.
Научный руководитель — д.т.н. Пашков И.Н.
МАИ, Москва
vagabungo@bk.ru

В современной технике разработано и используется множество различных типов двигателей, в том числе и газотурбинные двигатели (ГТД). ГТД широко применяются в авиационной, наземной и морской технике. В общем объеме мирового производства ГТД в стоимостном выражении авиационные двигатели составляют около 70%, наземные и морские – около 30%. В современной гражданской и военной авиации ГТД практически полностью вытеснили поршневые двигатели и заняли доминирующее положение. Их широкое применение в энергетике, промышленности и транспорте стало возможным благодаря более высокой энергоотдачи, компактности и малому весу по сравнению с другими типами силовых установок.

Распространение таких высокотехнологичных агрегатов, как ГТД было бы невозможно без технического прогресса в различных областях. Пайка занимает особое место в производстве ГТД. Большинство узлов, созданных с помощью пайки, не представляется возможным сделать каким-либо иным способом. В современном ГТД можно встретить все существующие виды паяных соединений.

Паяные соединения весьма технологичны и имеют высокие прочностные характеристики. Пайка нашла широкое применение при соединении деталей направляющих аппаратов компрессора, соплового аппарата, форсунок топливного коллектора, сотовых уплотнений, трубопроводов, а также для создания износостойких покрытий на бандажных полках лопаток и исправления различных дефектов.

При пайке никелевых жаропрочных сплавов, а также при создании износостойких покрытий на бандажных полках титановых лопаток широкое применение получили порошковые припои. В частности, для пайки сотовых уплотнений, сопловых блоков, направляющих аппаратов и других узлов рабочие температуры которых могут достигать Траб=900°С используют жаропрочные порошковые припои ВПр11-40Н, ВПр24, ВПр42. Для наплавки износостойких покрытий на бандажные полки титановых лопаток применяют композицию припоя ВПр16 и карбида вольфрама.

При использование порошковых припоев, сталкиваются с рядом проблем. В частности, для пайки тонкостенных конструкций, таких как сотовые уплотнения, требует высокой точности его дозировки и равномерного нанесения на сотоблок. За многие годы были разработаны несколько технологических приемов точной дозировки и закрепления порошковых припоев. В основном они делятся на два типа: первый заключается в рассыпание порошка припоя на паяемые поверхности с предварительным или последующим закреплением полимерными связующими; второй в предварительном приготовлении паяльной пасты с последующим ее нанесением на детали под пайку. Данные способы хорошо себя зарекомендовали, однако они несут ряд ограничений в использовании. Так, для нанесения припоя на некоторые конструкции сотовых уплотнений доступ для дозатора рассыпающего порошок припоя ограничен, что приводит к необходимости предварительного нанесения припоя на сотоблок. Применение порошковых припоев в виде лент на полимерных связующих позволит точно дозировать припой, а также укладывать его предварительно в сотоблок. Точное дозирование порошка припоя в объеме ленты повышение его технологичности позволит расширить использование порошковых припоев используя ленту в виде закладного элемента.

Наплавка износостойких покрытий является второй широкой областью применения порошковых лент на полимерных связующих. В современном двигателестроении широко применяется наплавка композиции порошка припоя и карбида вольфрама на бандажные полки лопаток компрессора низкого давления. Технология наплавки композиции весьма трудоемка и имеет большую зависимость от человеческого фактора. Использование заранее нарубленных лент с точным объемным соотношением карбида вольфрама позволит снизить трудоёмкость и влияние человека на процесс. Также использование подобных материалов для наплавки найдет широкое применение при ремонте и изготовлении не только деталей ГТД, но и в инструментальной промышленности.

## Возможности использования Verge3D для создания учебных инженерных интерактивных 3D приложений

Овчарова П.А.
Научный руководитель — Власенко А.Н.
МАИ, Москва
p_ovcharova@mail.ru

Современный образовательный процесс, при подготовке инженерных специальностей, уже не обходится без графического и видеоматериала, а также 3D моделей, сделанных в системах автоматизированного проектирования. Для того, чтобы все это можно было продемонстрировать необходима установка специализированных программ, что не всегда удобно и затратно. Одним из компромиссных решений, для решения данной проблемы, является совмещение всех перечисленных возможностей в интернет браузере.

Уже сегодня интернет браузер является приложением, позволяющим просматривать не только изображения или видео, но в том числе и 3D модели. Также браузер – это одна из немногих динамично развивающихся кроссплатформенных программ, поддерживающая самые передовые технологии. На рынке существуют программы позволяющие создавать интерактивные 3D браузерные приложения, одной их которых является - Verge3D.

Приложение Verge3D – это дополнение (аддон) к программам Blender 3D и Autodesk 3ds Max, основанное на JavaScript библиотеке Three.js и формате 3D графики glTF (GL Transmission Format). Программный продукт позволяет напрямую без написания кода экспортировать 3D сцену в формате html, при этом для просмотра, кроме браузера, не требуется установка дополнительных программ. Приложение Verge3D также является отечественной разработкой с открытым исходным кодом, с GPL лицензией для образовательных целей.

Для создания интерактивных сцен используется редактор пазлов (Puzzles). Редактор основан на визуальном языке программирования Google Blockly.

Для тестирования возможностей Verge3D с целью создания учебного интерактивного приложения были выбраны 3D модели элементов машины контактной сварки МТР-1701 спроектированные в учебной версии TFLEX CAD 3D и экспортированные в формате stl (stereolithography), в Blender 3D. Приложение наглядно демонстрирует основные элементы конструкции машины и принципы их работы. Используются эффекты прозрачности, поясняющих надписей и нелинейной анимации.

Посмотреть в offline режиме проекты сделанные при помощи Verge3D не получиться во всех браузерах, так как подгружаются данные из внешнего файла в формате glTF, а браузеры типа Microsoft Edge, Google Chrome и т.п. не поддерживают по умолчанию загрузку внешних данных. Для решения этой проблемы необходимо запускать приложение с любого локального веб сервера (WAMP – Windows, Apache, MySQL и PHP) или использовать в качестве браузера Mozilla Firefox.

Приложение Verge3D можно рекомендовать для создания учебных интерактивных приложений в разных сферах деятельности. Необходимо также отметить, что приложение относительно недавно (ноябрь 2017 года) появилось на рынке и его функционал пока уступает приложениям подобного рода, типа Blend4Web.

## Нанесение композитного покрытия $Nb/Nb_5Si_3$ на ниобиевый сплав магнетронным напылением

Павлов Ю.С., Овчарова П.А.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Лозован А.А.
МАИ, Москва
Pavlov.yuri93@yandex.ru

Ниобиевые сплавы с защитными силицидными покрытиями много лет широко применяются в аэрокосмической промышленности, как в нашей стране (например, для изготовления камер сгорания ЖРД малой тяги), так и за рубежом (например, сплав С-103). В данной работе исследуется процесс нанесения композитного покрытия $Nb/Nb_5Si_3$ на ниобиевый сплав НБ5ВМЦ магнетронным распылением с целью его дальнейшего возможного использования в качестве связующего слоя термобарьерного покрытия. Применение данного композита в работе в роли связующего вызвано следующими обстоятельствами:

так как подложка выполнена из сплава ниобия, то слой $Nb/Nb_5Si_3$ должен иметь хорошую адгезию к ней;

по сравнению с самыми передовыми суперсплавами на основе никеля, которые в настоящее время используются в авиационных турбинах, он может выдерживать более высокие температуры и имеет более низкую плотность [1].

Для получения слоистого композита напыление проводилось поочередно: одновременно двумя магнетронами M1-Nb и M2-Si (формировали 1,3,5,7 слои) и одним магнетроном M1-Nb (формировали 2,4,6,8 слои) при включенном ионном источнике при давлении PAr = 9,5×10-4 Торр. Скорость вращения образца 15-20 об/мин.

Напыление проводили при различных режимах работы магнетронов, 2 из которых представлены ниже.

Режим напыления образцов 1:

1,3,5,7 слои:

M1 – ниобий (Nb) : ток 2,4 А, напряжение – 400 В, мощность – 1,0 кВт.

M2 – кремний (Si) : ток - 0,4 А, напряжение – 600 В, мощность - 0,2 кВт.

2,4,6,8 слои:

M1 – ниобий (Nb) : ток 2,9 А, напряжение – 400 В, мощность – 1,2 кВт.

Всего напылялось 8 слоев. Каждый слой напылялся в течение 7 минут. Весь процесс напыления 56 минут. Приблизительная толщина полученного покрытия 10 мкм.

Режим напыления образцов 2:

1,3,5,7 слои:

M1 – ниобий (Nb) : ток 0,9А, напряжение - 360В, мощность – 0,3кВт

M2 – кремний (Si) : ток - 0,4А, напряжение - 615В, мощность - 0,3кВт

2,4,6,8 слои:

M1 – ниобий (Nb) : ток 3,0А, напряжение - 435В, мощность – 1,3кВт

Всего напылялось 8 слоев. 1,3,5,7 слои напылялся в течение 15 минут, 2,4,6,8 в течение 20 минут. Весь процесс напыления 140 минут. Приблизительная толщина полученного покрытия 12мкм.

В работе показано, что для формирования силицида $Nb5Si_3$, а следовательно и слоистого композита, необходимо было проводить отжиг при температуре 1200 °С в течение 3-х часов

и P = 8×10-5 Торр. При этом в покрытии образовались и другие различные силициды $Nb_xSi_\gamma$. Далее с помощью электронной микроскопии проводили исследования поперечного сечения многослойных $Nb/Nb_xSi_\gamma$ образцов, для чего были изготовлены шлифы, на фотографиях которых хорошо видна слоистая структура. При этом толщина обоих слоев выдержана равномерно по всей толщине покрытия.

Список литературы:

1. S. Drawin, J.F. Justin. Advanced Lightweight Silicide and Nitride Based Materials for Turbo-Engine Applications. J. Onera Aerospacelab 2011, 3, p.1-13 URL: http://www.aerospacelab-journal.org/sites/www.aerospacelab-journal.org/files/AL3-06.pdf (дата обращения 12.02.2018).

## Исследование механических и трибологических свойств покрытий из композиционных материалов, армированных квазикристаллами, полученных методом холодного газодинамического напыления

Сидоров Д.Н.
Научный руководитель — д.т.н. Сильченко О.Б.
МАИ, Москва
dima-97@yandex.ru

Наибольшие усилия разработчиков сосредоточены на создании полимерных антифрикционных материалов, предназначенных для работы в режиме гидродинамического трения.

Основными техническими преимуществами при работе в среде масла антифрикционных материалов на основе металлополимеров, керамополимеров и композиционных материалов является меньшая разность между статическим и динамическим коэффициентами трения, что существенно улучшает динамику переходных процессов в машинах, а также бесшумность работы и малый удельный вес.

Антифрикционные материалы должны удовлетворять следующим требованием: иметь высокий коэффициент теплопроводности, низкий коэффициент трения, стабильный до температуры 450-500ºС, низкие параметры по износу, высокие упругие и прочностные характеристики.

Для эксплуатации узлов трения при температурах до 500ºС в полной мере удовлетворяют керамические и композиционные материалы на основе карбида кремния и карбонитрида титана.

Разработка состава и режимов нанесения покрытия методом холодного газодинамического напыления

Нанесение покрытия производилось с использованием метода холодного газодинамического напыления.

Рабочая поверхность образцов подвергалась перед напылением шлифованию, затем струйно-абразивной обработке.

Нанесение покрытия проводилось на установке «Димет-403»

Покрытие наносилось в защитной камере использовании системы вентиляции с пылеочисткой.

Благодаря невысокой температуре напыления квазикристаллическая фаза химически не взаимодействует с медью, а большая скорость потока обеспечивает образование прочных связей между компонентами покрытия.

Для приготовления порошковых смесей использовались порошки квазикристаллов марки ВКК1Б ТУ 1-595-31-1081 и меди ПМС-1 ГОСТ 4960. В итоге был получен порошок с дисперсностью менее трех мкм.

Были определены концентрации исходных элементов в зависимости от объёмной доли квазикристаллов.

Опробовано несколько составов порошковых смесей с различным содержанием квазикристаллов, определены оптимальные режимы напыления.

Полученные образцы представляли собой прямоугольные стальные пластины (90х20х2) с композиционным покрытием, толщиной 0,5 мм.

Металлографические исследования показали, что частицы квазикристаллов равномерно распределены в медной матрице, пористость покрытия незначительная. Однако, прочность сцепления частиц квазикристаллов с медной матрицей оказалась мала, вследствие чего был скорректирован состав покрытий.

Использовалась полученная средняя фракция. Крупные, сферической формы частицы железа не включаются в состав покрытия, в то же время, они обладают существенной кинетической энергией для того, чтобы дополнительно уплотнять и деформировать покрытие.

Избыток частиц железа в смеси приводит к сильной деформации наносимого слоя, появлению трещин в покрытии и уменьшению сцепления с подложкой вплоть до отслаивания. Недостаточное количество – не дает эффекта увеличения прочности сцепления квазикристаллов с медной матрицей.

Для улучшения адгезии принято решение перед нанесением покрытия наносить подслой чистой меди.

Окончательно был принят следующий состав порошковой смеси: медь - 78,2 %, квазикристаллы – 12,7 %, железо – 9,1 % по массе. Учитывая, что порошок железа в состав покрытия не включается, это соответствует 14 % весового содержания квазикристаллов или 30 % объемного.

Исследование шлифов полученых покрытий подтвердило отсутствие заметной пористости и улучшение сцепления частиц квазикристалла с матрицей.

Определение механических и трибологических свойств покрытия

Адгезия полученного покрытия оценивалась методом изгиба по ГОСТ 9.302-88. Образцы продемонстрировали удовлетворительную адгезию (протокол испытаний №3615/31).

Микротвердость покрытия определялась по ГОСТ 9450-76 на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 20г.

Исследованы трибологические свойства покрытия. Проведены испытания на трение и износ (протокол испытаний №3565/05).

Микротвердость покрытия составляет для медной матрицы от 388 до 407 МПа, для зерен квазикристалла от 1290 до 1393 МПа.

Коэффициент трения по стали 30Х13 составил в среднем 0,48. Износ контртела при осевой нагрузке 30 МПа и относительной скорости 0,1 м/с составил в среднем 408 мг/час.

## Исследование процеса ультразвуковой микросварки токовыводящих контактов с фотопреобразователями космического назначения

Тарасов В.И., Слабиков Б.А.
Научный руководитель — профессор, к.т.н. Садковский Б.П.
МАИ, Москва
vov1187@yandex.ru

Современные предприятия России, специализирующиеся на изготовлении и сборке панелей солнечных батарей космического назначения, сталкиваются с определенными сложностями, а именно с технологическими потерями при коммутации Фотопреобразователей (ФП) микроконтактной точечной сваркой (МКТС) расщепленным электродом и значительной трудоемкостью при обслуживании оборудования.

Целью данной работы является установление возможности применения Ультразвуковой сварки (УЗС) в технологии сборочно-сварочных операций серебряных токовыводящих контактов (шин) с серебряным покрытием контактных площадок ФП из кремния и арсенида галлия, на предприятии АО «НПП «Квант».

Существующий на предприятии процесс МКТС осуществляется за счет нагрева при пропускании электрического тока через соединяемые детали до температуры плавления основного материала. Для стабильной работы сварочной машины основными условием, обеспечивающим качество сварных точек, является подготовка деталей и электродов. Расщепленный электрод имеет пирамидальную форму рабочей части и в процессе длительной работы окисляется, в связи с чем увеличивается контактное сопротивление «электрод-деталь». Для уменьшения окисления введен поддув аргона в место сварки. Увеличение сопротивления может привести к непровару сварной точки или термоудару. При термоударе в местах сварки может иметь место отслаивание серебряного покрытия, а также появление трещин на ФП.

Для обеспечения стабильной сварки необходимо регулярно производить механическую зачистку рабочей поверхности электрода и выдерживать размер 0,2±0,02 × 0,3±0,02 мм. Собранная секция должна обладать определенной стойкостью соединений при вибрационных и ударных нагрузках, а при работе в космосе - стойкостью к периодическому термоциклированию в температурном режиме от – 1000С до + 2000С.

УЗС различных конструктивных микроэлементов получила в современном производстве широкое распространение. Процесс осуществляется в твердой фазе, без существенного нагрева соединяемых деталей. При УЗС используется щадящий режим, и данный процесс можно использовать при работе с термочувствительными деталями. Во время процесса сварки на поверхностях «деталь – деталь» происходят деформации и разрушение поверхностных пленок, вследствие чего качество диффузии значительно возрастает. В данном случае способ УЗС отличается от контактной сварки своей прогрессивностью. Процессы УЗС характеризуются малым потреблением мощности оборудования и меньшей изнашиваемостью рабочего инструмента. Это упрощает обслуживание сварочной установки и сокращает технологические потери.

АО «НПП «Квант» проведены испытания сварочной установки УМС-21У для соединения фигурных шинок к контактным площадкам ФП внахлест. Испытания сварочного оборудования и технологии сварки проводились в ООО «Эко-тех микроэлектроника».

Исследование получения качественного сварного соединения происходило в соответствии с действующими требованиями конструкторской и технологической документации.

Подбор и отработка режимов сварки на установке УЗС производились на опытных образцах. После определения режимов сварки с положительными результатами испытаний на отрыв, были сварены контрольные образцы ФП.

Оценка качества сварного соединения происходила с проведением разрушающего контроля. Проверку механической прочности на отрыв коммутационной шины от контактной площадки ФП производили в соответствии с действующей инструкцией по сварке. Соединенный контакт должен выдерживать воздействие усилия на отрыв под углом 900С к плоскости ФП не менее 0,49Н (50 гр.).

При отрыве хорошо приваренных шин сварные соединения разрушались по материалу шин с сохранением сварных отпечатков на контактах ФП, что является определяющим свойством качества сварного соединении. Раскол и трещинообразование пластин ФП при сварке не наблюдались.

По результатам испытаний контрольных образцов ФП установлено, что технология

УЗС может быть применена для сварки токовыводов из серебряной фольги 0,03 мм к серебряному покрытию ФП из кремния и арсенида галлия. По результатам разрушающих испытаний, сварная точка от токовывода остается на контактной площадке ФП, что является

определяющим свойством качества сварного соединения. Замена процесса сварки с использованием установок МКТС расщепленным электродом на УЗС позволит уменьшить финансовые и временные затраты, а так же автоматизировать сварочные операции при сборке солнечных батарей.

## Опробование системы автоматизированного проектирования ЛПС лопаток ГТД

Трубицына А.Н.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Смыков А.Ф.
МАИ, Москва
tr.anna.nikolaevna@yandex.ru

На ФГУП «НПЦ газотурбиностроения «Салют» опробована, разработанная на кафедре «Т и САПР МП» система автоматизированного проектирования литниково-питающих систем (ЛПС) для литья по выплавляемым моделям рабочих и сопловых лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) с равноосной структурой. В этой системе автоматизированное решение задач проектирования технологических процессов литья лопаток ГТД представляет собой определенную последовательность действий расчета параметров технологических процессов их получения и последующей проверкой полученных результатов [1].

Данная последовательность проектирования, по сути, представляет интегрированную САПР ТП литья лопаток, поскольку связывает две подсистемы - синтеза технологических процессов с их оптимизацией и анализа технологических процессов на основе математического моделирования. В первой подсистеме для выбранного типа ЛПС производятся расчеты компоновки блока лопаток ГТД, распределение температуры по элементам блока в конце его заливки (одновременно проверяется выбранная температура заливки), последовательности затвердевания этих элементов и размеров ЛПС. Также в случае необходимости подбираются технологические средства воздействия на затвердевание проблемных участков лопаток и определяются их параметры. Во второй подсистеме осуществляется анализ процесса формирования литого изделия по ранее спроектированной технологии. В данном случае, вторая подсистема, активно используемая на предприятии, служит апробацией спроектированного технологического процесса лить лопаток ГТД.

Для проверки работоспособности системы были предложены 3Д - модели трех изделий лопаток ГТД и поставлена задача спроектировать для них ЛПС. После автоматизированного проектирования ЛПС для каждого из изделий осуществлена их апробация в отделе САПР предприятия с помощью моделирующих программных комплексов «ProCast» и «Полигон». Результаты моделирования подтвердили качество планируемого литья по отсутствию дефектов усадочного происхождения и по отсутствию в структуре отливок столбчатых кристаллов.

Литература:

Неуструев А.А., Моисеев В.С., Смыков А.Ф. Разработка САПР технологических процессов литья // «ЭКОМЕТ», 2005

# Исследование влияния рубидия и цезия на процесс кристаллизации силумина

Федорцов Р.С.
Научный руководитель — к.т.н. Петров И.А.
МАИ, Москва
super.fedorsov2013@yandex.ru

Процесс кристаллизации представляет собой сложный физико-химический процесс, он может протекать с разной скоростью и под влиянием различных внешних факторов. На процесс затвердевания сплавов оказывают влияние их физические характеристики и условия охлаждения отливки. Существенную роль при этом играют технологические факторы, к котором относятся различные вида обработки расплава и особенно модифицирование. От особенностей кристаллизационного процесса в большой степени зависит уровень эксплуатационных свойств отливок. Поэтому очень важно изучить комплекс параметров кристаллизационного процесса, научиться управлять их ходом и таким образом получать отливки с высокими механическими свойствами.

В настоящей работе проводились исследования процесса кристаллизации узкоинтервального сплава АК12, обработанного щелочными металлами. Ранее было определено, что обработка расплава рубидием или цезием, оказывает положительное воздействие на механические свойства сплава АК12 [1].

Был проведен дифференциальный термический анализ (ДТА) сплава АК12. Исследования проводились на дифференциальном сканирующем калориметра Netzsch DSC404 F4 Pegasus. В результате были определены температурные характеристики процесса кристаллизации исследуемых сплавов.

Анализ термограмм ДТА показал, что процесса затвердевания исследуемого сплава происходит в два этапа. На первом этапе происходит зарождение и рост кристаллов алюминиевого твердого раствора. На втором этапе происходит кристаллизация эвтектики, которая протекает по реакции $L \rightarrow \alpha + Si$ [2].

Интервал кристаллизации немодифицированного сплава АК12 зафиксирован на термограмме ДТА: температура ликвидус равна 578,1 ºС, температура солидус - 571,0 ºС, следовательно интервал кристаллизации равен 7,1 ºС. При обработке сплава рубидием температура ликвидуса равна 578,7 ºС, температура солидуса - 545,3 ºС, а интервал кристаллизации равен 33,4 ºС. Температура ликвидуса при обработки АК12 цезием равна 578,0 ºС, а температура солидуса равняется 541,5 ºС, в результате интервал кристаллизации равняется 36,5 ºС. Анализ параметров кристаллизации сплава АК12 при обработке его рубидием показал, что температура ликвидуса остаётся на уровне немодифицированного сплава АК12, а температура солидуса при этом понижается на 25,7С°. При обработке цезием температура ликвидуса остаётся на уровне немодифицированного сплава АК12. Температура солидуса понижается на 29,5°С относительно немодифицированного сплава. Понижение температуры солидуса связано с воздействием рубидия и цезия на процесс кристаллизации, как щелочных металлов. Их присутствие приводит к переохлаждению расплава.

Полученные при обработке термограмм ДТА данные показывают, что модифицирующая обработка расплава рубидием и цезием оказывает существенное влияние на процесс кристаллизации сплава АК12.

Список литературы:

1. Петров И.А., Ряховский А.П., Федорцов Р.С. Исследование влияния модифицирования расплава азотно-кислыми солями щелочных металлов на свойства сплава АК12 // Технология легких сплавов. 2017. № 3. С. 75-80.

2. Петров И.А., Бережной Д.В., Ряховский А.П., Моисеев В.С. Влияние эффекта модифицирования на процесс кристаллизации алюминиевых сплавов системы Al-Si. Металлы. 2017. № 2. С. 29-32.

## Проверка возможности соединения элементов термоэлектрического модуля с помощью цинкового припоя

Шаргаев Е.О.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Пашков И.Н.
МАИ, Москва
eshargaev@gmail.com

В настоящее время актуальной является задача увеличения рабочих температур термоэлектрических преобразователей, а также, повышения надежности их работы. Повышение рабочих температур связано с температурой пайки элементов. В настоящее время термоэлектрические элементы паяются припоями Sn-Sb (Тпл. = 230ºС) и Au-Sn (Тпл. = 280ºС), что позволяет провести исследования по применению нового более высокотемпературного припоя и тем самым повысить рабочие температуры термоэлектрических элементов.

Основной целью работы являлась проверка возможности соединения элементов термоэлектрического модуля с помощью цинкового припоя.

В качестве решения данной задачи возможно использование бесфлюсовой пайки в защитной атмосфере аргона с приложением давления или вибрации.

Для исследования были получены образцы термоэлектрического элемента состава Bi-Sb-Te, с нанесённым антидиффузионным барьерным покрытием из Ni и Sn, и иммерсионным золотым покрытием. Поверх иммерсионного золотого покрытия газодинамическим методом наносилось покрытие алюминия толщиной 30-40 мкм.

Припой, в виде фольги, толщиной 200 мкм прокладывался между термоэлектрическим элементом и алюминиевой шиной. В качестве материала припоя использовался припой $Zn_4Al$.

Пайка осуществлялась в вакуумной печи УВП-1 в атмосфере аргона и нагреве от 440ºС до 500ºС.

Исследования на электронном микроскопе свидетельствуют о том, что отсутствие Al покрытия приводит к растворению припоем Ni и Au подслоя, а также к разрушению полупроводникового материала во всем диапазоне температур. Таким образом, наличие Al покрытия обязательно.

Исходя из результатов, можно сделать вывод, что соединение, с помощью бесфлюсовой пайки, припоем $Zn_4Al$ возможно в интервале температур 440 - 480ºС с приложением давления или вибрации, которые разрушают оксидные пленки и позволяют достичь плотные равномерные швы.

Задачи дальнейших исследований состоят в том, что необходимо определить оптимальную форму и толщину припоя, определить диапазон рабочих давлений на образец и исследовать влияние толщины Al покрытия.

# Термодинамический анализ возможности модифицирования расплава оксидом титана

Шляпцева А.Д., Шелихевич А.С.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Ряховский А.П.
МАИ, Москва
dimash881@yandex.ru

Способ введения титана в алюминиевый расплав при модифицировании с помощью фтортитанатов имеет ряд недостатков, среди которых относительная дороговизна и дефицитность данных солей. В качестве альтернативного титансодержащего сырья предлагается использовать более доступный диоксид титана, что позволило бы значительно расширить область применения титансодержащего модификатора.

Однако, диоксид титана, являясь амфотерным оксидом, нерастворим в воде и многих других растворителях и считается веществом сравнительно инертным. Инертность наряду с такими физическими свойствами, как малая летучесть и высокая температура плавления (1870°C), объясняются полимерным состоянием диоксида. Его диссоциация с выделением кислорода происходит только при очень высокой температуре [1].

При нагревании активность диоксида титана повышается, он вступает в реакцию с кислотами, основаниями, реагирует с галогенидами щелочных металлов, восстанавливается металлами, водородом, углеродом и т.д. [2].

Модифицирующий эффект действия диоксида титана зависит от степени усвоения титана расплавом и возможности взаимодействия диоксида с основой сплава – алюминием с образованием интерметаллидов, а также его взаимодействия с примесями и другими добавками.

Для оценки возможности модифицирования силумина диоксидом титана необходимо термодинамически оценить вероятность протекания реакции алюмотермическое восстановление титана из диоксида.

В процессе плавки каждый металл может служить восстановителем для других элементов, имеющих меньшую отрицательную величину образования оксидов металлов, чем металл восстановитель.

Так как изобарно-изотермический потенциал образования оксида титана меньше потенциала образования оксидов Zr, Al, Ca, то термодинамически возможно прохождение реакций восстановления титана из его оксида данными металлами.

Для термодинамической оценки возможности диоксида титана вступать во взаимодействие с расплавом силумина при температурах плавки, был проведен расчет изменения изобарно-изотермического потенциала реакций алюминотермического восстановления оксидов титана.

При термодинамическом анализе реакций алюмотермического восстановления окислов необходимо учитывать, что восстанавливаемость окислов зависит не только от их прочности, определяемой величиной изобарного потенциала, но и от их концентраций в расплаве.

При постоянной величине константы равновесия реакции изменение концентрации какого-либо вещества вызывает изменение равновесных концентраций других веществ, участвующих в реакции. В связи с этим повышение степени восстановления окислов можно реализовать путем вывода из сферы реакции образующихся продуктов. Например, с помощью растворения образующегося оксида алюминия в другом веществе. Для сдвига равновесия реакции восстановления трудновостановимых оксидов вправо большое значение имеет растворитель.

Таким образом, термодинамически более выгодно восстановление диоксида титана алюминием до низшего оксида TiO, нежели до чистого Ti. Реакция восстановления

монооксида титана TiO алюминием не идет вследствие положительной величины изменения изобарного потенциала. Таким образом, образование титана в расплаве при одиночном введении диоксида титана маловероятно. При этом кремний не является восстановителем из-за меньшего химического сродства с кислородом по сравнению с оксидом алюминия.

Список литературы

1. Искикава Н. Кобаяси Ё. Фтор. Химия и применение: Пер. с японск. – М.: Мир, 1982. – 280 с.
2. Рысс И.Г. Химия фтора и его неорганических соединений – М.: Госхимиздат, 1956 – 720 с.

## Обоснование эффективности обработки расплава фторидами щелочных и щелочноземельных металлов

Щербина А.С., Шляпцева А.Д.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Ряховский А.П.
МАИ, Москва
sunny.scherbina@inbox.ru

Традиционно добавки фторидов во флюсах используют для рафинирования алюминиевых расплавов. На практике применяют хлоридно-фторидные флюсы, содержащие повышенное количество хлоридов по сравнению с фторидами. Исключительно фторидные рафинирующие составы почти не применяют, обосновывая это тем, что такой флюс имеет повышенную температуру плавления.

Фториды щелочных металлов действуют как поверхностно-активные вещества, снижающие поверхностное натяжение как между флюсом и металлом, так и между флюсом и оксидами. Они способны проникать в оксидные пленки и растворять оксиды многих металлов, в том числе алюминия [1]. Перечисленные выше свойства фторидов щелочных и щелочноземельных металлов могут оказаться эффективным при создании модифицирующего состава для силуминов. Наличие фторидов в составе модифицирующего флюса позволит повысить активность вводимой смеси.

Фториды улучшают смачиваемость алюминием частиц модифицирующих металлов, выполняют роль активаторов алюмотермического восстановления и тем самым повышают вероятность образования в расплаве тугоплавких соединений, являющихся дополнительными центрами кристаллизации.

Необходимо отметить, что применение фторидов не ограничивается только ролью реакционно-активных добавок в модифицирующем составе. Наличие в составе указанных солей поверхностно-активных по отношению к кремнию элементов, таких как щелочные и щелочноземельные металлы, позволяет рассмотреть данные соли как модифицирующие эвтектический кремний. Модифицирующее влияние на α–твердый раствор будет наблюдаться в случае использования комплексных фторидов переходных металлов.

Фториды щелочных, щелочноземельных металлов и переходных металлов в низших степенях окисления имеют ионную структуру.

Модифицирование алюминиевых сплавов указанными солями возможно только в случае восстановления поверхностно-активных элементов из их фторидов. Восстановление элемента обеспечивается за счет химического взаимодействия алюминиевого расплава с содержащими поверхностно-активные элементы фтористыми солями и/или взаимодействием между компонентами модифицирующей смеси.

Для оценки химической активности фторидов при взаимодействии с алюминиевым расплавом были произведены расчеты величины изменения энергии образования соединений.

На основании проведенных исследований можно заключить, что с точки зрения возможности использования фторидных солей в качестве модификаторов алюминиевых сплавов ключевыми свойствами являются температура плавления фторидных смесей, что влияет на возможность восстановления поверхностно-активного элемента из соли и растворимость во фторидах оксида алюминия и других оксидов металлов.

Одиночное введение большинства указанных солей не должно приводить к переходу модифицирующих элементов в расплав. Поэтому для создания фторидной добавки на основе поверхностно-активных элементов для алюминия следует применять несколько фтористых солей.

Список литературы

1. Напалков В.И., Махов С.В., Бобрышев Б.Л., Моисеев В.С. Физико-химические процессы рафинирования алюминия и его сплавов / Под ред. В.И. Напалкова. – М.: Теплотехник, 2011. – 496с.

## Исследование термической стабильности дисперсных частиц титано-алюминиевых сплавов на основе интерметаллических фаз γ(TiAl) и α2($Ti_3Al$) полученных методом ЭВКР

Ярошенко А.С.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Серов М.М.
МАИ, Москва
aleksandr_yaroshenko@list.ru

В последнее время к перспективным высокотемпературным конструкционным материалам относят титано-алюминиевые сплавы на основе интерметаллических фаз γ(TiAl) и $\alpha_2$($Ti_3Al$). К преимуществам данных материалов можно отнести высокую удельную прочность и повышенную температуру сопротивления ползучести.

В процессе обработки слитков или литья на основе фаз γ-(TiAl) и $\alpha_2$($Ti_3Al$) с содержанием алюминия 45-48%, часто происходит образование макроскопических столбчатых зерен и выраженной микросегрегации легирующих элементов. Эти особенности литой микроструктуры трудно удалить, и они являются вредными для механических свойств.

Снизить уровень микросегрегаций и количество макроскопических столбчатых зерен позволяет метод высокоскоростного затвердевания расплава. Данный метод позволяет получать метастабильные структуры и повышать их однородность, путём повышения растворимости легирующих элементов и примесей, и снижения уровня сегрегации, что способствует повышению механических свойств титан-алюминиевых сплавов на основе интерметаллических фаз γ(TiAl) и $\alpha_2$($Ti_3Al$).

Одним из методов высокоскоростной закалки расплава является метод экстракции висящей капли расплава (ЭВКР), разработанный в МАТИ им. К.Э. Циолковского. Данным методом были получены дисперсные частицы титано-алюминиевых сплавов на основе интерметаллических фаз γ(TiAl) и $\alpha_2$($Ti_3Al$).

В данный момент проводятся исследования термической стабильности полученных дисперсных частиц. Температурный диапазон воздействия лежит в пределах от 800 0С до 1100 0С, временные интервалы от 30 минут до двух часов. Планируется провести математическое моделирование процесса термической обработки, при помощи дробного факторного эксперимента для двухуровневых факторов.

Дисперсные частицы титан-алюминиевых сплавов на основе интерметаллических фаз γ(TiAl) и $\alpha_2$($Ti_3Al$), полученные методом ЭВКР, не имеют дефектов присущих слиткам или литью тех же сплавов, поэтому представляется интерес провести исследования структуры данных частиц после термической обработки и сопоставить полученные результаты с результатами полученными методом математического моделирования.

# Секция №8.4 Полимерные и углеродные композиционные материалы, технологии производства изделий из неметаллических материалов

## Влияние взрывного прессования на свойства сверхвысокомолекулярного полиэтилена

Ан Д.А.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Адаменко Н.А.
ВолгГТУ, Волгоград
dmitriyan1993@gmail.com

Конструкционные материалы на основе СВМПЭ находят широкое применение в технике. Особые свойства полимера используются при создании конструкций, работающих в специальных условиях. Не всегда существующие технологии получения изделий из СВМПЭ и его композиций удовлетворяют необходимым требованиям. Технология взрывного прессования (ВП) полимеров расширяет возможности применения труднoперерабатываемых термопластов.

В работе изучалось влияние ВП на структуру и свойства СВМПЭ при последующем термическом воздействии. Для этого плоские образцы одинаковой плотности (0,91 г/см3) из исходного и обработанного взрывом СВМПЭ, полученные статическим прессованием давлением 100 МПа, и обработанного взрывом (Р = 0,6 ГПа) по плоской схеме нагружения скользящей ударной волной, подвергали спеканию в свободном состоянии. Спекание проводили в интервале температур 150-200 °С, а время выдержки (30 мин/мм) выбирали исходя из предыдущих исследований по спеканию термопластов. После спекания измеряли плотность, прочность при растяжении и пластичность полученных материалов.

В результате исследований установлено, что после ВП порошкового СВМПЭ наблюдается одновременное увеличение прочности с 31 до 50 МПа и пластичности с 260 до 450 % по сравнению со статически спрессованным полимером. Такие изменения обусловлены структурными преобразованиями, произошедшими при высокоэнергетическом воздействии, что привело к снижению степени кристалличности полимера с 70 до 40 % и образованию на поверхности частиц активных центров, «схватывание» которых при последующем нагреве и выдержке обеспечило формирование между макромолекулами жесткого каркаса.

## Определение характеристик ВФ композиционного материала ТН – СЭВ и ТН – ПНП

Борисов А.А., Виноградов Р.Е., Сперанский К.А.
Научный руководитель — профессор, к.т.н. Гусев Д.Е.
МАИ, Москва
wypukborisov@gmail.com

Для проявления эффекта памяти формы композиционным материалом (КМ) его полимерная матрица должна обеспечивать возможность значительной деформации армирующих волокон в диапазоне температур восстановления формы (ВФ). Для этого температурный интервал работоспособности полимера должен перекрывать температуры деформации и конца ВФ никелида титана. Кроме того, модуль упругости материала матрицы

должен быть значительно ниже «эффективного» модуля упругости никелида титана. Этим требованиям удовлетворяет значительное количество полимеров, из которых для разработки функционального КМ с ВФ были выбраны термопласты – полиэтилен низкой плотности (ПНП) и сэвилен (СЭВ).

В качестве армирующих волокон использовали проволоку из сплава ТН1 с содержанием никеля 55,7% по массе.

Образцы композиционных материалов изготавливали в виде пластин размером 10х80 мм и толщиной от 1,5 до 5,5 мм. Волокна располагали вдоль длинной стороны образцов в один ряд на одинаковом расстоянии друг относительно друга для обеспечения равномерного распределения полимера между волокнами. Объемную долю волокон в композиционном материале изменяли от 15 до 55%.

Исследования деформационных характеристик начинали с определения способности накапливать остаточную деформацию при нормальной температуре.

Образцы КМ после деформации изгибом на 9% выдерживали под нагрузкой в течение различного времени, и после снятия нагрузки проводили замеры упругой и остаточной деформации.

В монолитном образце сэвилена степень остаточной деформации увеличивается при выдержках до 1 часа и далее стабилизируется на уровне 1,3%.

Следует учитывать степень наполнения композита волокнами из сплава ТН1, т.к. с увеличением объемной доли волокон возрастает накопленная деформация. Для композита с объемной долей волокон 18% накопление 5,6% остаточной деформации происходит в течение получасовой выдержки, а для композита с $V_в$=55% за то же время – 7,5%.

Исследования характеристик ВФ КМ ТН – СЭВ проводили на образцах с объемной долей волокон 18% и 55%. Было установлено, что для образцов с $V_в$=55% наблюдается неполное восстановление формы $\varepsilon_н$=0,2% при $\varepsilon$=4,2% и соответственно 1,7% при 10%.

Упругая деформация растет линейно и достигает максимального значения в 1,7% при 10 % наведенной деформации. По-видимому, на способность к совместной деформации кроме времени выдержки оказывает влияние низкая прочность СЭВ при разрыве (не более 11 МПа).

В образцах с 18 об. % волокон недовосстановление формы наблюдается после 5 % наведенной деформации ($\varepsilon_н$=0,2 % при $\varepsilon$=5,3 % и $\varepsilon_н$=1 % при $\varepsilon$=11,1 %). В связи с тем, что объемная доля волокон в этом композите значительно снижена (в 3 раза) происходит заметный рост упругой деформации ($\varepsilon_у$=2,6 %, при $\varepsilon$=11,1 %). Температурный интервал восстановления формы остается почти неизменным и составляет 10-12°С. Рост температур восстановления формы композита с большим содержанием волокон опережает (до 9°С) соответствующую характеристику для менее наполненного композита.

В монолитном образце полиэтилена степень остаточной деформации увеличивается при выдержках до 15 минут и далее стабилизируется на уровне 0,8 %. В образцах композита с $V_в$=55 об. %, скорость роста остаточной деформации выше, а достигаемая степень остаточной деформации примерно в 10,4 раза больше ($\varepsilon_о$=8,3 %), чем в монолитном образце.

Испытания ВФ образцов ТН – ПНП показали, что при деформациях свыше 5 % в них наблюдается неполное восстановление формы. Максимальная невосстановленная деформация достигает 1,7 % при 10 % наведенной. Температуры конца восстановления формы образцов из КМ ТН – ПМП возрастают на 2-10 °С по сравнению с температурой Акв сплава ТН1.

Увеличение объемной доли волокон в композиционном материале принципиально не меняет характеристики ВФ.

У образцов с объемной долей $V_в$=28 % невосстановленная деформация появляется при 11 % наведенной, поэтому образцы деформировали изгибом на 9, 11 и 13 % при этом волокна в композитах подвергались деформации на 4, 5 и 6 %, соответственно.

Проведенные исследования работоспособности композита ТН – ПНП показали, что максимальная удельная работа ВФ материала (Vв=28 %) достигает 0,5 МДж/м3 при развиваемых реактивных напряжениях 46 МПа после наведенной деформации 11 %. Установлено, что с повышением объемной доли волокна в КМ линейно возрастает удельная работа ВФ композита. Таким образом, варьируя степень наполнения волокном композита возможно управление деформационными, температурными и силовыми характеристиками ВФ КМ ТН - ПНП в широких пределах.

## Разработка моделей и исследование напряженного состояния дискретно-армированного стеклопластика на основе термопластичной матрицы

Гапоненко И.В.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Салиенко Н.В.
МАИ, Москва
vaneq555@mail.ru

В современных авиационных конструкциях наряду со слоистыми, непрерывно армированными полимерными композиционными материалами (ПКМ) на основе термопластичных матриц, широко применяются дискретно армированные термопласты. Введение коротких волокон в термопластичные материалы, позволяет создавать материалы с улучшенными прочностными и теплофизическими свойствами, достаточными для надёжной работы таких ПКМ в различных конструкциях. Кроме того очевидны экономическая целесообразность и более простые технологии переработки дискретно армированных ПКМ по сравнению с непрерывно армированными.

Целью работы является разработка модели и исследование напряженного состояния ПКМ на основе дискретных стеклянных волокон и поликапроамидной матрицы.

Для исследования влияния микроструктуры ПКМ на деформационно-прочностные свойства при различной нагрузке, в качестве базовой была использована модель Кокса. Модель содержит дефект в виде краевого эффекта торцов волокон на границе раздела волокно-матрица. Расчетные исследования проводились в программном комплексе ANSYS. С помощью метода конечных элементов (МКЭ) исследовали поведение модифицированной модели Кокса при различных степенях деформирования стеклянных волокон (25%, 50%, 100% от разрушающей). Построены зависимости нормальных и касательных напряжений на границе раздела волокно-матрица от размеров дефектной зоны.

В рамках экспериментальных исследований были изготовлены образцы стеклопластика на основе дискретных волокон длиной 5мм методом прессования при температуре 230□С, давлении 2,5 МПа и времени выдержки под давлением 15мин. Механические характеристики образцов стеклопластика определялись испытаниями на растяжение по ГОСТ Р 56785-2015. Проведённый анализ результатов физического эксперимента и численного моделирования показал хорошую корреляцию расчётных и экспериментальных данных.

# Изучение свойств композиционных материалов на основе углеродосодержащих наполнителей в СВЧ диапазоне

Гафиятуллина С.И., Камалов А.Н., Ибатуллин И.М.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Магсумова А.Ф.
КНИТУ-КАИ, Казань
ms.syumbelya@mail.ru

С каждым годом все более насущной проблемой становится защита критических систем летательных аппаратов от воздействия электромагнитного излучения (ЭМИ) с внедрением новых цифровых электронных систем управления. Особенно опасными могут оказаться такие внешние источники, как радиолокационные передатчики и радиолокационные станции военного назначения, спутниковая связь, работающие в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ). Перспективными методами борьбы с данными явлениями является создание экранов ЭМИ на основе полимерных композиционных материалов [1, 2], характеризующихся наличием широкого спектра самых разных видов наполнителей.

Целью настоящего исследования стало изучение экранирующих характеристик полимерных композиций, содержащих порошкообразные углеродосодержащие наполнители, в СВЧ диапазоне.

В работе были использованы эпоксидно-диановая смола марки ЭД-22, отвердитель на основе алифатических аминов полиэтиленполиамин (ПЭПА) и порошкообразные углеродные наполнители, такие как шунгит и технический углерод (П234, П514, К354, Т900). Содержание наполнителя варьировалось в диапазоне от 10 до 30% масс.

Для получения экранирующих характеристик, к которым относятся коэффициент отражения Г, определяющий способность материала отражать попадающее на него излучение, и коэффициент передачи К, показывающий количество поглощенной материалом энергии, при частоте до 10 ГГц, можно воспользоваться такими диэлектрическими характеристиками, как диэлектрическая проницаемость ε^' и тангенс угла диэлектрических потерь tgδ. Значение этих диэлектрических параметров было получено с помощью векторного анализатора цепей E5071C с дополнительно подключенным коаксиальным зондом.

В ходе экспериментальных исследований образцы (20х20х30мм) были изготовлены с помощью специальной силиконовой формы. Одним из важных требований к образцам являлась гладкая плоская поверхность образца, к которой прикладывался коаксиальный зонд. Обработку поверхности образцов проводили на шлифовально-полировальном станке Struers LaboPol-35. На основе полученных данных были рассчитаны коэффициенты отражения Г и передачи К. Эти величины характеризуются как максимально возможные при прохождении электромагнитной волны ортогонально исследуемому сечению. В случае изменения геометрии поверхности или угла падения сигнала, значения могут быть другими, не превышающими расчетные по модулю.

Проанализировав полученные результаты для разных образцов, было выяснено, что все образцы в большей степени работают на отражение. Наибольшие же значения коэффициента отражения были выявлены для образцов с наполнителями П234 и П514 как при 10, так и при 30% масс.

Список литературы:

Банный В.А. Перспективы создания композиционных радиопоглощающих материалов на основе полимеров / В.А. Банный, В.А Ковтун // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2015. - Т. 15, № 2. - С. 125-128.

Характеристики отражения и передачи электромагнитного излучения трудновоспламеняемых экранов на основе углеродосодержащих материалов / О.В. Бойправ [и др.] // Доклады БГУИР. - 2017. - № 6 (108). - С. 63-68.

# Разработка модели и исследование свойств термопластичного композиционного материала на основе непрерывных органических волокон

Гуреев И.А.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Салиенко Н.В.
МАИ, Москва
dirik2012@yandex.ru

Непрерывно армированные полимерные композиционные материалы (ПКМ) на основе термопластичных матриц и органических волокон находят применение в ответственных элементах современных авиационных конструкций. Надежность эксплуатации деталей и изделий из армированных ПКМ зависит не только от свойств материалов, но и от наличия в них скрытых структурных неоднородностей и несплошностей, приводящих к снижению физико-механических характеристик материала. Для органических волокон на основе ароматических полиамидов (СВМ, Кевлар, Терлон и т.д.) из-за особенностей их структуры характерно наличие большого количества дефектов на поверхности волокон. Кроме того, высокая вязкость расплавов термопластичных связующих и близкие значения поверхностных энергий волокна и матрицы не позволяют в процессе пропитки полностью заполнить межволоконное пространство, что приводит к образованию дефектов в виде пор.

Для уменьшения дефектности органических волокон, пор в межволоконном пространстве и достижения хорошего взаимодействия на границе раздела «волокно-связующее» при их совмещении, и, следовательно, более полной реализации свойств ПКМ в работе предложено использовать предварительную обработку органических волокон низковязким раствором мономера, отверждённая полимерная матрица из которого имеет максимальное сродство с поликапроамидной.

Целью работы является разработка модели и исследование свойств ПКМ на основе непрерывных органических волокон с граничным слоем из отверждённого полимера и поликапроамидной матрицы.

Для исследования влияния микроструктуры ПКМ, содержащего граничный слой, на деформационно-прочностные свойства при различной нагрузке была разработана конечно-элементная 2D модель, содержащая дефект в виде поры на границе раздела «волокно-матрица». Для моделирования использован программный комплекс ANSYS. Исследовано поведение модели при различных степенях деформирования органических волокон. Построены зависимости нормальных и касательных напряжений на границе раздела «волокно-матрица» от размеров дефектной зоны. Это позволило снизить количество экспериментальных исследований, необходимых для подтверждения работоспособности предложенной модели.

В рамках экспериментальных исследований были изготовлены образцы однонаправленного органопластика прессованием пакета заготовок из 11 слоёв тканого полуфабриката на основе непрерывных органических нитей Терлон линейной плотностью 29,4 Текс, обработанных мономером, и поликапроамидной мононити линейной плотностью 14 Текс. Режим отверждения мономера: температура 135 градусов, время 40 мин. Режим прессования: температура 210 градусов, давление 2,5 МПа и времени выдержки под давлением 20 минут. Механические характеристики образцов органопластика определялись по стандартной методике. Проверка разработанной модели на адекватность показала хорошее совпадение результатов моделирования с экспериментальными данными.

# Исследование влияния условий переработки резиновых смесей на процессы структурообразования и комплекс свойств вулканизатов на основе бутадиен-стирольных каучуков

Дорофеева А.Н.
Научный руководитель — доцент, д.т.н. Наумова Ю.А.
МИРЭА, МГУПИ, МИТХТ, Москва
nanocntpolimer@gmail.com

Эластомерные материалы на основе бутадиен-стирольных каучуков являются основными в индустрии синтетических каучуков и занимает около 50% всего мирового потребления синтетических каучуков. БСК находит широкое применение в производстве шинах (до 75% объема потребления), автомобильных запчастей, уплотнителей, прокладок, уплотнительных колец, в изготовлении подошвы в обувной промышленности, благодаря отличным свойствам высокой стойкости к истиранию и высокому проценту наполняемости.

Бутадиен-стирольные каучуки устойчивы к механическим деформациям, агрессивным растворителям, обладают хорошей газо- и водопроницаемостью. Благодаря присутствию боковых фенильных группировок БСК отличается повышенной стойкостью к негативному воздействию радиационного облучения (в сравнении с иными разновидностями каучуков). При снижении количество стирола в исходной смеси происходит повышение морозостойкости, однако, эластичность каучука уменьшается. При нагревании БСК от 125 °С, наблюдаются серьезные структурные изменения, что негативно отражается на физико-механических свойствах получаемой резины (снижение жесткости и деструкция). У резиновых смесей, которые изготовлены на базе бутадиен-стирольных каучуков, невысокая клейкость, повышенная усадка при каландровании и шприцевании. Это негативно отражается на осуществлении технологических процессов, а также при проведении клейки (сборки) заготовок резиновых изделий.

В данной работе было исследовано влияния природы наполнителей на процессы структурообразования и комплекс технологических и эксплуатационных свойств материалов получаемых переработкой растворов бинарных смесей полимеров.

Исследование влияния условий переработки резиновых смесей на структуру и свойства вулканизатов на основе бутадиен-стирольных каучуков, является актуальной и востребованной задачей современной науки и техники.

В результате исследований было установлено:

- Зависимость между температурой вулканизации и временем вулканизации, а так же индукционным периодом (при увеличении температуры переработки с 140 до 180 оС время индукционного периода сокращается в 8-10 раз).
- Показано, что каландрованная резиновая смесь оказывает не значительное влияние на кинетику процесса вулканизации (не более 2-5 %).
- Установлена зависимость комплекса физико-механических характеристик от параметров переработки.
- Произведена оценка влияния условий переработки на реометрические и физико-механические свойства.
- Проведено исследование технологических свойств резиновой смеси и физико-механических свойств вулканизатов на основе СКМС-10 РКП АХК.

# Повышение термоокислительной стабильности полифениленсульфида для формования матричных волокон

Зуев К.В.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Бухаров С.В.
МАИ, Москва
kostya2302@bk.ru

Одним из перспективных гетероцепных термопластичных полимеров является полифениленсульфид (ПФС). Данный материал обладает достаточно высокой термоокислительной стабильностью – согласно данным ТГА (термогравиметрический анализ), температура начала потери веса в азоте и на воздухе составляет приблизительно 500 оС. Несмотря на это, близость температур перераработки и начала деструкции достаточно остро ставит вопрос о стабилизации во время переработки и эксплуатации, в том числе при повышенных температурах. В литературе выделяется два механизма термической деструкции ПФС – распад цепи (уменьшение молекулярной массы, снижение вязкости) и сшивание (образование трехмерной структуры, увеличение молекулярной массы и вязкости, появление неплавких сшитых гелей).

Формование волокон из расплава ПФС сопровождается высокими температурами (>300 оС) и длительным временем пребывания полимера в формующем оборудовании, что может привести к термоокислительной и термомеханической деструкции. Совокупность этих факторов делает актуальным вопрос подбора оптимальной системы стабилизации при производстве волокон из ПФС, поскольку изменение свойств полимера в течение процесса переработки может приводить к нарушению технологического процесса и снижению качества формуемого волокна (снижению комплекса физико-механических свойств, обрывам волокна при намотке, нестабильности толщины волокна при заданной скорости намотки, закупориванию фильер сшитыми частицами или наличию гелей в волокне в виде дефектов).

В ходе работы осуществлен выбор оптимальной марки ПФС с точки зрения термостабильности и качества исходного материала. Были исследованы следующие марки ПФС от различных производителей: Fortron (Ticona), Torelina (Toray), NHU (China). Для выбранных марок проводились испытания различных систем стабилизации, содержащих замедлитель сшивания (фенольный антиоксидант), антацид (гидротальцит марки DHT-4A (Kisuma Chemicals)) и вторичный антиоксидант-органофосфит (снижение пожелтения в процессе переработке и предотвращение деполимеризации).

Оценка производительности системы стабилизации производилась с помощью измерения ПТР (показатель текучести расплава) расплава, оценки изменения ПТР после увеличенного времени выдержки и измерения вязкости на капиллярном реометре.

Дополнительная оценка эффективности работы стабилизаторов были проведена путем изучения параметров процесса изготовления волокна на лабораторном капиллярном реометре.

По результатам проведенных экспериментов выбраны наиболее эффективные марки стабилизаторов, а также их соотношение, обеспечивающее наибольшие стабильность свойств материала в процессе переработки и параметров технологического процесса получения волокна. Также отмечены различия в характере термомеханических превращений линейных и разветвленных марок ПФС одного производителя – для разветвленных марок более ярко выражена деструкция по механизму сшивки (причиной данного различия может быть увеличенная концентрация концевых групп, однако подтверждение данной теории требует дополнительного изучения).

## Влияние полиуретан-эпоксидной композиции на температуру стеклования отвержденного эпоксидно-фенольного связующего и эффект памяти формы полимерного композиционного материала на его основе

Кобзев М.С., Сёмкин В.В.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Агапов И.Г.
МАИ, Москва
max-spore@mail.ru

Эпоксидно-фенольное связующее ЭНФБ широко используется для изготовления элементов аэрокосмических конструкций, в том числе, трансформируемых, из полимерных композиционных материалов (ПКМ). Полимерная матрица на основе ЭНФБ обладает высокой температурой стеклования, но слабым проявлением эффекта памяти формы (ЭПФ).

Целью работы являлось исследование влияния полиуретан-эпоксидной композиции (ПЭК), проявляющей ярко выраженный ЭПФ в отвержденном состоянии, на свойства связующего ЭНФБ.

Объекты исследований представляли собой гомогенные композиции, содержащие от 3 до 50% (масс.) ПЭК в пересчете на сухой остаток, полученные путем смешения компонентов (ПЭК и ЭНФБ) при комнатной температуре, а также, образцы ПКМ на основе углеродной ткани УТ-900 и вышеуказанных композиций, изготовленные методом прессования.

Для определения температуры стеклования отвержденных композиций использовали прямой крутильный маятник и образцы микропластиков, полученные путем пропитки композициями жгута из стекловолокон с последующей термообработкой при температуре 170°С в течение четырех часов. В процессе испытаний температуру образцов повышали от комнатной до 180°С со скоростью 2-4°С. В результате проведенных испытаний установлено, что температура стеклования отвержденных композиций составляет 130, 120, 115, 105 и 90°С при содержании ПЭК в композициях 3, 6, 12, 25 и 50% (масс.) соответственно.

Для оценки влияния ПЭК на проявление ЭПФ предварительно нагретым плоским образцам ПКМ с размерами 100х10х1 мм придавали U-образную форму, а затем охлаждали их для фиксации формы. При повторном нагревании образцы активно восстанавливали свою первоначальную форму. Степень восстановления формы образцов составила 94, 95, 96, 98 и 99% при соответствующем вышеуказанном содержании ПЭК в композициях.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что ПЭК снижает температуру стеклования отвержденных композиций, но повышает эффект памяти формы ПКМ.

## О возможности прогнозирования свойств ПКМ на основании квантовохимических расчетов параметров связующего

Колпачков Е.Д., Аверина А.Е.
Научный руководитель — д.т.н. Лаптев А.Б.
ФГУП «ВИАМ», Москва
eegrvich@yandex.ru

В настоящее время полимерные композиционные материалы нашли широкое применение в повседневной жизни человека. Их можно встретить в составе изделий от бытового назначения до аэрокосмической отрасли. В процессе эксплуатации, комплекс физико-механических свойств изделий на основе ПКМ изменяется, снижая ресурс работы, а иногда повышая риск отказа системы. Для оценки остаточного ресурса и наиболее точного прогнозирования эксплуатационных свойств изделий на основе полимерных

композиционных материалов необходимо понимать связь структуры материала и воздействующих факторов.

Одним из основных климатических факторов, оказывающих вклад в снижение комплекса свойств изделий на основе ПКМ, является влага, другими словами адсорбированная вода. Она покрывает поверхность изделий, постепенно проникая в объём, придавая пластичность и значительно снижая конструкционную прочность изделий из ПКМ. Это явление объясняется двумя механизмами: во-первых, вода является пластификатором и как следствие увеличивает свободный объём, во-вторых, проникая в структуру изделия, вода снижает температуру стеклования, в результате чего фазовый переход может произойти в диапазоне рабочих температур. Эти проблемы наиболее актуальны для авиационной отрасли, т.к. в последние годы ПКМ начали широко использоваться во внешнем контуре самолёта. В следствии всего выше описанного, необходимо знать особенности той или иной структуры полимерного материала и его склонность к адсорбции влаги.

В основе всех химических взаимодействий лежит качественная и количественная разность зарядов. Известно что в молекулах различных соединений на каждом атоме входящем в состав имеется промежуточный заряд. Как правило этот заряд зависит от природы атома и атомов соединенных с ним. Применительно к адсорбции воды полимерами, эти заряды являются необходимым условием для образования Ван-дер-ваальсовых связей. Предположить механизм адсорбции воды, увидеть распределение зарядов в молекуле полимера и рассчитать их величину можно с помощью методов молекулярной механики и квантовой химии. В данной работе была использована программа HyperChem (Hypercub, Inc.). Программа реализует полуэмперические и неэмперические методы расчета, а именно решает уравнение Шредингера для атомов и молекул с использованием различных приближений. Для решения поставленной задачи был использован метод AM1, наиболее точный и оптимизированный метод для органических молекул, содержащих атомы азота и кислорода.

Для рассмотрения взаимосвязи распределения зарядов в молекуле полимера с его способностью сорбировать влагу будет использован диглицидиловый эфир бисфенола А и три различных отвердителя: гексаметилендиамин, метафенилендиамин и 3,5-диамино-1,3,5-триазин [1].

Присоединение молекул воды происходит по полярным группам OH- и NH- [2]. Расчет показал, что для всех выбранных молекул заряд на OH-группе не зависит от структуры и составляет (-0,320±0,005) эВ, а заряд на NH-группе уменьшается с увеличением жесткости структуры полимера. Для гексаметилендиамина, метафенилендиамина и 3,5-диамино-1,3,5-триазин значения зарядов составили (-0,330±0,005), (-0,280±0,005) и (-0,240±0,005) эВ соответственно.

Расчет показал, что от выбора отвердителя зависит не только величина заряда NH-группы, но и конечная структура полимера.

Известно, что адсорбция молекул воды происходит за счет относительно слабого, но способного фиксировать молекулу воды на поверхности полимера Ван-дер-ваальсова взаимодействия.

Ван-дер-ваальсовы взаимодействия является короткодействующими: энергия взаимодействия быстро снижается с ростом расстояния между молекулами или атомами r (пропорционально $1/r^6$). Но эти взаимодействия весьма существенны при непосредственном контакте между молекулами (атомами, химическими группами).

Таким образом, адсорбция воды на поверхности полимера зависит от величины поверхностных зарядов, в частности на NH-группе, поэтому в ряду использованных в работе отвердителей эпоксидных смол: гексаметилендиамин, метафенилендиамин, 3,5-диамино-1,3,5-триазин адсорбция влаги снижается, соответственно снижается степень влагонасыщения полимера в целом и снижается пластичность, что в итоге приводит к длительному сохранению конструкционной прочности изделий из ПКМ.

Предлагаемый способ оценки степени влагонасыщения ПКМ позволяет на основании полуэмпирического метода расчета квантовохимических параметров связующего прогнозировать свойства ПКМ при длительном воздействии климатических факторов.

## Разработка волокнистых углеродкерамических композиционных материалов на основе поликарбосиланов, модифицированных элементорганическими соединениями тугоплавких металлов

Королев А.П.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Бухаров С.В.
МАИ, Москва
alex193@list.ru

Материалы карбидной или карбонитридной природы на основе сочетания непрерывных волокнистых каркасов различной текстильной формы и неорганических связующих с аморфной или нанокристаллической структурой относятся к классу волокнистых керамоматричных композиционных материалов (ВККМ). Они способны выдерживать действие высоких температур, окислительных сред и эрозионных газовых потоков, сохраняя на требуемом уровне показатели физико-механических и тепло-физических свойств, обеспечивая эксплуатационные характеристики изделий на их основе.

ВККМ могут конкурировать с высокотемпературными металлическими сплавами и углерод-углеродными композиционными материалами при создании новых образцов авиационной и ракетной техники, поэтому разработка таких материалов является актуальной задачей современного материаловедения и химической технологии.

Технологии изготовления ВККМ можно разделить на две больших группы: первый способ – метод газовой инфильтрации (CVI) тканной преформы, второй – пропитка тканной преформы раствором или расплавом кремнийорганического прекурсора и последующий пиролиз (PIP), высокотемпературная карбидизация в инертных средах.

В рамках данного направления нами ранее выполнен комплекс исследований по изготовлению ВККМ PIP методом с использованием углеволокнистых преформ и растворов поликарбосиланов. Полученные образцы материалов имели высокие показатели физико-механических свойств. Однако стабильность свойств при повышенных температурах оказалось не удовлетворительной для планируемой области их применения. В настоящей работе рассмотрено результаты изучения возможностей PIP-технологии для изготовления карбидокремниевых керамокомпозитов на основе поликарбосиланов, модифицированных элементорганическими тугоплавкими металлами (ПКС-м).

Основное отличие данного карбидообразующего полимера заключается введение на стадии синтеза в его молекулярную структуру звеньев, содержащих элементы тугоплавкие металлов. Были выбраны тугоплавкие металлы типа Zr и Hf, которые по литературным данным придают традиционным керамическим материалам повышенные значения физико-механических свойств при высоких температурах.

Для изготовления ВККМ PIP методом использовали углеволокнистые тканные преформы и растворы ПКС-м разной концентрации и состава. Набор требуемого количества керамической матрицы в ВККМ достигали многократной пропиткой, удалением растворителя и пиролизом ПКС-м в инертный среде.

Исследована структура ВККМ на основе ПКС-м и влияние исходного элементного состава ПКС-м на показатели физико-механических свойств при повышенных температурах в окислительных средах. Изучены возможности PIP - технологии и процессы образования ВККМ со свойствами, превышающими аналоги на основе немодифицированных ПКС.

# Функционализация наночастиц магнетита различными алкоксисиланами методом золь-гель синтеза

Кулябко Л.С., Малютин М.С., Ратников А.В.
Научный руководитель — д.х.н. Кыдралиева К.А.
МАИ, Москва
l.kyluabko@gmail.com

Формирование in situ магнитных наночастиц на стадии конденсации полимер-неорганической матрицы является перспективным путем получения ферромагнитных мелкодисперсных наполнителей с заданными значениями магнитной проницаемости. Использование алкоксисиланов в качестве полимерной защитной оболочки магнетита позволяет получать целый ряд функциональных гибридных материалов, в том числе и для радиопоглощающих покрытий в стелс-технологиях [1]. Такие ферромагнитные проводящие частицы очень малого размера в полимерной самоконденсирующейся оболочке позволяют в ряде случаев решить имеющиеся проблемы в этой области, в частности, ограниченной возможности вводить наночастицы с достаточно высокой плотностью в жидкую полимерную матрицу из-за высокой адсорбционной способности при уменьшении размера частиц [2].

В настоящем исследовании магнитные композиты со структурой ядро–неорганическая оболочка получены путем иммобилизации на поверхности наночастиц магнетита оксидов кремния (Fe3O4/SiO2) золь-гель методом, который заключается в гидролизе и поликонденсации тетраэтоксисилана (TEOS) в щелочных условиях в этаноле. Способность магнитных наночастиц оксидов железа сорбировать диоксид кремния обусловлена закреплением на магнетите за счет гидроксильных групп поверхности Fe3O4 [3]. Благодаря химической инертности и высокой концентрации силанольных групп на поверхности полученные материалы Fe3O4/SiO2 далее использовали для последующей селективной модификации с целью создания магнитных композитов с многослойными гибридными оболочками. Для получения полифункциональных магнитных композитов со структурой ядро–многослойная гибридная оболочка использовали 3-аминопропил-триэтоксисилан (APTES), позволяющий получить комбинированное кремнийорганическое покрытие.

В процессе синтеза путем регулирования концентрации компонентов и условий синтеза варьировали состав и структуру получаемых ферромагнитных материалов. С целью контроля и прогнозирования магнитных свойств формирующихся металлополимерных наноструктурных материалов изучена структурная организация формирующихся металлополимерных нанокомпозитов (фазовое состояние, размерные характеристики).

По данным ренгенофазового анализа фаза магнетита при поэтапной (layer-by-layer) функционализации силанольными производными не изменилась, на что указывают также и средние размеры наночастиц, рассчитанные по уравнению Шеррера для каждого образца – 11,3÷12,6 нм.

Для исследования механизма стабилизации наночастиц Fe3O4 использовался метод ИК-спектроскопии, позволяющий определить, какие модифицирующие группы силанольных производных находятся на поверхности магнетита. На спектре магнетита обнаружены полосы поглощения в области 886 и 944 см-1, принадлежащие деформационным колебаниям Fe-OH групп, которые находятся на поверхности магнетита при данных условиях синтеза. Полосы поглощения в области 3650-3200 см−1 также отвечают колебаниям OH-групп поверхности магнетита и воды и свидетельствует о наличии водородных связей.

При добавлении TEOS наблюдается появление полос поглощения в области 869 и 960 см-1, характерных для Si-O группы. Наблюдается появление новой полосы каркасных колебаний и связей Si–O–Si в TEOS в области 1080 см-1. Дальнейшая модификация поверхности Fe3O4 APTES приводит к появлению полос при 3407, 3304, 3287 см−1, что

указывает на колебания первичных аминогрупп и, следовательно, образование связи в системе Fe3O4/TEOS/APTES. При увеличении концентрации APTES до 1,5 масс. % для образца Fe3O4/TEOS/APTES1.5 наблюдается незначительное смещение полос аминогрупп.

Полученные результаты иллюстрируют образование структур ядро-оболочка на примере высокотехнологичного метода золь-гель синтеза, при котором оксиды кремния в процессе поликонденсации обусловливают самоорганизацию формирующейся металлополимерной структуры, включающую регуляцию размеров полимерных фрагментов на уровне наночастиц оксида железа. Предметом дальнейших исследований авторов является установление корреляций «предыстория получения - химический состав частицы и состояние поверхности - фазовый состав/структура - морфология (размер частиц) - магнитные свойства (намагниченность насыщения, ферромагнитное или суперпарамагнитное состояние)» с целью получения функциональных нанокомпозитов с заданными свойствами.

1. Kolanowska A., Janas D., Herman A.P. et al From blackness to invisibility – carbon nanotubes role in the attenuation of and shielding from radio waves for stealth technology. Carbon, 2018, Vol. 126, P. 31-52.

2. Лагарьков А. Н., Погосян М. А. Фундаментальные и прикладные проблемы стелс-технологий. Вестник Российской академии наук, 2003. Том 73. № 9. С. 779-787.

3. Cornell R.M., Schwertmann U. The iron oxides: structure, properties, reactions, occurences and uses. Wiley-VCH, 2003, 664 p.

## Получение изделий и покрытий на основе УФ-отверждаемых композиций

Курмашева Л.Р., Сурнова А.В.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Андрианова К.А.
КНИТУ-КАИ, Казань
lafee333@yandex.ru

В настоящее время все более широкое применения находят новые высокоскоростные методы отверждения изделий и покрытий. На смену традиционным термоотверждающимся приходят более прогрессивные полимерные связующие, отверждаемые менее энергоемкими способами. Одним из таких методов является отверждение УФ-излучением. Способ используют главным образом при получении покрытий и изделий, способных отверждаться за счет реакции фотополимеризации.

УФ-отверждение обладает рядом существенных преимуществ: отверждение происходит при комнатной температуре с использованием оборудования, характеризующегося невысокой ценой, компактностью, портативностью и малым энергопотреблением. Также особенностью данного метода является возможность отверждения при температуре окружающей среды от + 5С° и высокая степень отверждения — свыше 90%. Однако основными преимуществами являются высокая скорость отверждения и отсутствие растворителей и выделения летучих продуктов, т.е. процесс УФ -отверждения более экологичен.

В данной работе исследована возможность получения изделий и покрытий на основе УФ-отверждаемых связующих. В качестве связующих использовали смеси эпоксидных олигомеров (ЭД-22, D.E.N.438) с рядом промышленных УФ-отверждаемых смол: POLYLITE® PO-4761, BÜFA®-Resin UP 0410 I, DION 9100. Процесс отверждения связующих исследовали с помощью дифференциального сканирующего калориметра с УФ-приставкой Photo-DSC 204 F1. С целью определения теплофизических характеристик отвержденных УФ-смол и смесевых композиций был проведен динамический механический анализ на трехточечный изгиб (DMA Q800). Для предварительной оценки

атмосферостойкости композиций проводили лабораторные испытания в климатической камере LG-XD110G.

На основе полученных данных были выбраны оптимальные составы для получения УФ-отверждаемого связующего с высокими теплофизическими и физико-химическими свойствами. Разработан технологический процесс получения складчатого изделия на основе УФ-отверждаемого связующего.

## Моделирование процесса пропитки шпангоута килевой балки эпоксиангидридным связующим с фосфониевым катализатором

Мадиярова Г.М., Хамидуллин О.Л., Сахбутдинова В.Р.
Научный руководитель — профессор, д.х.н. Амирова Л.М.
КНИТУ-КАИ, Казань
gulnazka_madiyarova@mail.ru

Повышенные требования к авиационным конструкциям из полимерных композиционных материалов (ПКМ) приводят к необходимости увеличения воспроизводимости и прогнозируемости свойств изделий за счет предварительного моделирования технологических операции в цифровой среде. В производстве композитных изделий на всех стадиях, от раскроя материала до формования, применяется ряд программных продуктов, позволяющих не только визуализировать и оптимизировать процесс, но и прогнозировать финальное качество изделия.

В работе рассматривается адаптация конструктивных решений и технологии изготовления шпангоута килевой балки из ПКМ. В результате перехода на композиционный материал прогнозируемое снижение массы конструкции составило не менее 30% по сравнению с металлическим аналогом. Весовая эффективность достигается за счет упрощения конструктивно-технологических решений и использования материала с большей удельной прочностью.

Технология изготовления изделий из ПКМ существенно отличается от металлических. Уникальными для композитных конструкций является операция совмещения матрицы и армирующего наполнителя, а также отверждение связующего. В работе сделан акцент на конечно-элементном моделировании процесса пропитки под давлением (RTM) сухой преформы новым низковязким связующим и процессе формования изделия. В качестве связующего использовалась эпоксиангидридная композиция с новым фосфониевым катализатором. Для конечно-элементного моделирования была использована программа PAM-RTM (ESI Group) с соответствующими модулями. Параметры кинетической модели реакции отверждения связующего определялись с использованием программы Thermokinetics3 (Netzsch) по данным ДСК на дифференциальном сканирующем калориметре DSC 204F1 Phoenix (Netzsch). Реологические свойства изучались на динамическом реометре RheoStress 6000 (HAAKE). Для повышения точности моделирования процесса пропитки вязкость связующего задавалась в виде функция зависимости, как от температуры, так и от степени конверсии. Моделирование процесса пропитки и формования проводились с учетом теплофизических свойств материалов. В результате работы были оптимизированы положение входных и выходных каналов в оснастке, а также температурно-временные режимы формования изделия. Оптимизированная схема трансфера позволила исключить образование сухих, непропитанных зон в готовом изделии. Параметры температурно-временного режима формования подбирались с целью исключения локального перегрева связующего, с одной стороны и недоотвержденных зон, с другой.

Данная работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках выполнения проекта с уникальным идентификатором RFMEFI57717X0262.

# Влияние микро- и нанокристаллической целлюлозы на свойства композиционных пленок из гидроксиэтилцеллюлозы

Мельников И.С., Сотникова Ю.С.
Научный руководитель — к.х.н. Демина Т.С.
МАИ, Москва
support-rubick@yandex.ru

Целлюлоза – линейный полисахарид, который в нативном растительном сырье образует фибриллярные волокнистые структуры, закрепленные водородными связями. В настоящее время среди различных модификаций целлюлозы наибольшее внимание привлекает получение и применение ее микро- и наноразмерных форм. Микрокристаллическую (МКЦ) и нанокристаллическую целлюлозу (НКЦ) получают путем экстракции кристаллических областей из нативной целлюлозы с помощью кислотного гидролиза аморфных областей. В зависимости от происхождения целлюлозы и условий обработки, выделенные кристаллические области могут значительно варьироваться по размерам, но для них характерна игольчатая морфология. МКЦ и НКЦ используют в медицине для таблетирования лекарственных препаратов, но, благодаря своей анизометрии, они имеют большой потенциал для применения в качестве экологически чистых армирующих наполнителей для улучшения физико-механических характеристик композиционных материалов, при изготовлении пленок и мембран в пищевой и медицинской областях. Цель работы заключалась в исследовании влияния введения различных концентраций МКЦ и НКЦ на механические свойства композиционных пленок из гидроксиэтилцеллюлозы.

В работе использовали гидроксиэтилцеллюлозу (ГЭЦ) Natrosol 250 (Ashland, США) двух марок: HHR и HHBR. МКЦ и НКЦ были получены методом кислотного гидролиза целлюлозы из льняной тресты (ООО АПК «Вологотчина», Россия) и охарактеризованы с помощью атомно-силовой и оптической микроскопии. Степень анизометрии для МКЦ составила 3.1 мкм, а для НКЦ 1.9 нм. Для приготовления композиционных пленок использовали 1 мас.% водные растворы ГЭЦ, в которые добавляли 0-10 мас.% МКЦ или НКЦ. Диспергирование наполнителя осуществляли или механическим перемешиванием на верхнеприводной мешалке при 700 об/мин в течение 10 мин. или ультразвуковой обработкой при 23 кГц в течение 3 мин. Влияние ультразвуковой обработки на растворы ГЭЦ оценивали с помощью вискозиметра Brookfield DV-E по измерению их вязкости, которая уменьшалась ~ в 2 раза после обработки. Механические свойства пленочных образцов исследовали на разрывной машине AGS-H (Shimadzu, Япония) со скоростью 1 мм/мин после выдерживания пленок в эксикаторе над насыщенным раствором (NH4)2SO4.

Изучение механических свойств пленочных материалов показало, что прочность ненаполненных пленок HHR и HHBR практически одинаковая и составляет 41 и 38 МПа, соответственно. Прочность при разрыве и модуль упругости наполненных композиционных пленок увеличиваются на 41-47% и достигают оптимума при введении 5 мас.% как МКЦ, так и НКЦ. Однако микронный размер МКЦ приводит к значительному уменьшению пленкообразующей способности гидроксиэтилцеллюлозы, наполненной 5-10 мас.%, что делает наноразмерную форму целлюлозы (НКЦ) более подходящей для получения композиционных материалов. Таким образом, как НКЦ, так и МКЦ могут быть успешно использованы в качестве армирующих наполнителей для изготовления композиционных пленок, например, в упаковочной промышленности.

Авторы выражают глубокую благодарность за помощь в проведении исследований к.т.н. И.Г. Агапову (МАИ) и к.х.н. Г.П. Гончарук (ИСПМ РАН); к.х.н. А.В. Истомину (ВИАМ) за предоставленные для исследований образцы МКЦ и НКЦ.

## Исследование замерзания воды на поверхности нанокомпозитов

Нагорная В.С., Мельников А.А., Соловьянчик Л.В.
ФГУП «ВИАМ», Москва
nagornaya.valera@yandex.ru

В настоящее время активно исследуется вопрос о возможности использования супергидрофобных покрытий в качестве антиобледенительных. Факторами, которые определяют эту возможность, является величина адгезии льда и задержка времени замерзания воды на такой поверхности. [1].

В работе предложена методика определения времени замерзания капель воды на поверхности нанокомпозитных материалов со сверхгидрофобными свойствами на основе силиконовой матрицы с помощью одновременной съемке в видимом и тепловизионном инфракрасном диапазоне. В качестве модификатора были исследованы два типа нанокомпозитов с углеродными нанотрубоками (УНТ): немодифицированными Таунит-МД и Таунит-МД функционализированные алкильными группами Е-130[2]. Для охлаждения капель воды использовалось термоэлектрическое устройство с максимальной потребляемой мощностью 50 Вт, позволяющее достичь температуры 20 °С на поверхности за 15-25 с

Предложенная методика позволила установить зависимость времени замерзания статичной капли на поверхности покрытий от концентрации углеродных нанотрубок в матрице. Использование УНТ в качестве модификатора позволило увеличить время замерзания в 1.5 – 4 раза по сравнению с контрольными (без УНТ). Данный результат связан с увеличением теплового сопротивления и уменьшением контактной площади покрытия и капли при повышении концентрации УНТ.

1. 1. Schutzius T. M. et al. Physics of icing and rational design of surfaces with extraordinary icephobicity //Langmuir. 2014. Т. 31. № 17. С. 4807-4821.
2. Шашкеев К.А., Нагорная В.С., Волков И.А., Кондрашов С.В., Дьячкова Т.П., Кондаков А.И., Борисов К.М., Юрков Г.Ю. Супергидрофобные электропроводящие покрытия на основе силиконовой матрицы и углеродных нанотрубок// Журнал прикладной химии. 2017, Т. 90. Вып. 7. С. 97-107. [Shashkeev K. A. et al. Superhydrophobic conducting coatings based on silicone matrix and carbon nanotubes //Russian Journal of Applied Chemistry. 2017. Т. 90. № 7. С. 1107-1116.]

## Использование экспериментально определенной длины когезионной зоны при оценке межслоевой трещиностойкости слоистых полимерных композиционных материалов методом конечных элементов

Новиков Г.В.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Бабаевский П.Г.
МАИ, Москва
ngv92@mail.ru

При оценке надежности и долговечности изделий из слоистых полимерных композиционных материалов (ПКМ) очень важно правильно определить их устойчивость к инициированию и росту межслоевых дефектов и трещин. В настоящее время наилучшим образом это достигается имплантацией в численные методы и конечно-элементные модели микромеханического подхода Баренблатта к оценке условий зарождения и роста трещин в псевдохрупких материалах по параметрам зоны предразрушения (процессной или когезионной зоны) в месте концентрации напряжения, в первую очередь, вблизи вершины существующей трещины. Нами, с использованием пакета прикладных программ ANSYS, разработана конечно-элементная 2D модель образца слоистого ПКМ (углепластика на основе эпоксидной матрицы и углеродной ткани) в виде двухконсольной балки (ДКБ) с

заданной трещиной, нагружаемой по моде I. В этой модели когезионная зона представляет собой напряженный тонкий слой материала впереди кончика трещины, поведение которого при нагружении образца описывается диаграммой локального разрушения, называемой законом когезионной зоны (ЗКЗ) и характеризующей зависимость локального напряжения от деформации (раскрытия зоны). Модель позволяет при известном или задаваемом ЗКЗ рассчитывать параметр трещиностойкости материала, а при известном или задаваемом параметре трещиностойкости определять ЗКЗ. При этом по длине когезионной зоны необходимо расположить определённое число когезионных конечных элементов, минимально необходимое количество которых определяется отношением длины когезионной зоны к заданной длине конечного когезионного элемента. Таким образом, точность расчетов с помощью модели напрямую зависит от точного значения длины когезионной зоны в образце, являющейся материальной константой.

Цель данной работы заключалась в определении длины когезионной зоны по экспериментально полученным параметрам углепластика (интенсивности высвобождения упругой энергии GIC, когезионной прочности σc и модулю упругости E) с использованием уравнения Баренблатта для выбора оптимальной длины и количества когезионных элементов. Необходимые для расчета длины когезионной зоны значения GIC определяли по стандартной методике с использованием образцов типа ДКБ, σc - по специально разработанной методике отрыва слоев УП при заданной площади их контакта и E – при изгибе стандартных образцов УП. С помощью полученного значения длины когезионной зоны, определяли количество и размер когезионных элементов. Это позволило повысить точность определения параметров трещиностойкости и ЗКЗ для ранее разработанной конечно-элементной 2D-модели образца ДКБ из углепластика.

## Сравнительный анализ характеристик эпоксидных пленочных связующих

Петрунина Е.С., Ахматова А.А., Мубаракзянова Д.Д.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Магсумова А.Ф.
КНИТУ-КАИ, Казань
e-petrunina96@mail.ru

В связи с актуальностью вопроса по замене автоклавного метода на другие методы формования, которые не уступают по качеству изготовления детали из полимерного композиционного материала, но при этом являются экономически выгоднее, был рассмотрен метод Resin Film Infusion (RFI). Как известно данный метод основан на применении связующего пленочного типа. Комплекс требований, предъявляемых к пленочным связующим, только повышает интерес исследователей к вопросам состава, технологии получения данных материалов.

Были рассмотрены пленочные связующие зарубежного (HexPlyM36, HexPly8552RFI, LFX 023, LFX 054, LFX 062 и др.) и отечественного (ВСЭ-19, ВСЭ-17П, ВСЭ-20) производства. Изучение литературы показало, что в основном связующие пленочного типа изготавливаются из эпоксидных смол. В связи с этим для разработки состава пленочного связующего было принято решения за основу выбрать высоковязкие эпоксидные смолы.

Первоначально было важным подобрать основы для смесевой композиции. Были приготовлены составы в различных соотношениях из эпоксидных смол марок: ЭТФ, ЭХД, ЭД-8, ЭД-10, ЭД-16, УП-643. Затем были проведены исследования реологических и теплофизических свойств смесей. Анализ полученных данных позволил выбрать образцы для дальнейших исследований на основе D.E.N.-438, ЭД-10, ЭХД в определенных соотношениях.

В качестве отверждающего агента для этих смесевых композиций были выбраны отвердители, находящиеся в различном агрегатном состоянии: 4,4'-диаминодифенилметан - в виде гранул, диэтилтолуилендиамин-80 – в виде жидкости янтарного цвета.

Далее проводились исследования уже приготовленных компаундов. Были исследованы: вязкость, температуры стеклования, липкость составов.

Результаты проведенных исследований позволили провести предварительную оценку технологических и эксплуатационных свойств полученных пленочных связующих и сделать выбор состава в пользу наиболее оптимального.

Данная работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках выполнения проекта с уникальным идентификатором RFMEFI57717X0262.

## Влияние алюминия и меди на теплофизические свойства политетрафторэтилена

Савин Д.В.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Адаменко Н.А.
ВолгГТУ, Волгоград
dmitrii-34@yandex.ru

В узлах трения машиностроительного оборудования широко применяют политетрафторэтилен (ПТФЭ), который обладает уникально низкими коэффициентом трения, химической и термическое стойкостью. Для повышения износостойкости, прочности при сжатии и снижения ползучести ПТФЭ наполняют металлами. Теплопроводность и тепловое расширение являются одними из основных параметров, характеризующих работоспособность антифрикционных материалов. Поэтому целью работы являлось изучение влияния дисперсных меди(Cu) и алюминия(Al) на теплопроводность и тепловое расширение фторопластовых композиционных материалов (КМ) полученных холодным прессованием и спеканием.

КМ получали путем смешивания порошков ПТФЭ сAl или Cu с последующим холодным прессованием (давлением 200 МПа) и спеканием при 380 °С. Содержание Al и Cu изменялось от 10 до 40 % об. Микроструктуры КМизучали на оптическом микроскопе Olympus 61BX. Плотность измеряли гидростатическим взвешиванием на аналитических весах Shinko HTR-220CE. Объемный коэффициент теплопроводности измеряли при 22 °С на установке КИТ-02Ц «Теплофон». Тепловое расширение наполненного ПТФЭ измеряли на установке термомеханического анализа Netzsch 402 F3 Hyperion по одноосной схеме.

Измерение плотности показало ее закономерное повышение с увеличением содержания металла, что свидетельствует о плотном контакте между металлами и ПТФЭ, что подтверждаетметаллографический анализ. Спекание снижает плотностьКМ с алюминием и практически не изменяет в КМ с медью. Установлено, что увеличениесодержанияметаллов с 10 до 40% сопровождается повышением теплопроводности с 1,2-1,4 до 1,4-2,2 Вт/м·К. После спекания теплопроводность снижается в 1,3-1,5 раз Вт/м·К вКМ с алюминиеми повышается в 1,1-1,2 раза с медью. При этом тепловое расширение КМ с 10 %меди немного ниже, чем с алюминием, а при наполнении до40% разницаисчезает. Спекание приводит кповышению тепловых деформацийКМ в области низких температур (до 315оС) и их снижениюв области высоких температур (до 400оС).

Повышение теплопроводности ПТФЭ и снижение теплового расширения с увеличением содержания металловсвязано сулучшением условийтеплопередачи и торможением частицами металлов тепловых колебаний макромолекул. Разница в значениях измеряемых характеристик в КМ, наполненных медью и алюминием может быть связанна с физико-химическими свойствами исходных порошков.

# Композиционные материалы на основе высокотемпературных термопластичных полимеров

Самойленко В.В.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Бухаров С.В.
МГОТУ, Королев
arcticmood@mail.ru

Создание конкурентной продукции авиационной, ракетно-космической и гражданской техники напрямую связано с появлением новых эффективных материалов. Среди полимерных материалов к данной категории относятся высокотемпературные конструкционные полимеры, которые обладают превосходным комплексом свойств: исключительно высокой термической, химической, огне-, тепло-, радиационной стойкостью, морозостойкостью и способны сохранять их длительное время в широком температурном диапазоне.

Существующие технологии получения высокотемпературных полимеров трудоемки, энергоемки, малопроизводительны и требуют специального дорогостоящего технологического оборудования. В силу сложности технологии получения высокотемпературные полимеры отличаются от остальных полимеров низкими объемами производства и очень высокой стоимостью реализуемой продукции. На совершенствование технологии получения высокотемпературных полимеров, таких как полиэфирэфиркетон, полифениленсульфид, полиэфиримидбыли направлены большие усилия исследователей; было описано множество различных подходов, однако эта проблема и до настоящего времени остается актуальной.

В последнее время значительно возрос интерес к термопластичным композиционным материалам, упрочненным непрерывными волокнами, как к материалам, способным заменить материалы на основе термореактивных связующих во многих сферах промышленности, причем не только авиационной и космической, но также и в машиностроении и автомобилестроении. В 80-х годах прошлого века в МАТИ была разработана волоконная технология получения органопластиков с термопластичной матрицей с применением термопластичных нитей из полиамида. В настоящее время актуальна проблема модернизации данной технологии под задачи и требования современной техники.

Целью дальнейшей работы является получение гибридной нити на основе высокотемпературных термопластичных полимеров, армированных непрерывным углеродным волокном, по модернизированной волоконной технологии. В ходе работы предстоит решить ряд задач, таких как подбор температурных режимов для регулирования вязкости расплава при получении волокна из термопластичных полимеров, разработка высокотемпературного аппрета на основе термопласта для улучшения процесса смачивания и дальнейшей пропитки армирующего волокна, а также конструирование и изготовление установки по совмещению нитей.

## Оценка межслоевой трещиностойкости слоистых полимерных композиционных материалов методом расклинивания

Скачков И.А.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Бабаевский П.Г.
МАИ, Москва
is.smoke@gmail.com

Определение межслоевой трещиностойкости слоистых полимерных композитов (ПКМ), является важной задачей в исследовании таких материалов, при проектировании конструкций из них, оценке их надежности и прогнозировании долговечности.

В существующих, в том числе стандартизованных, методах ее определения при наиболее опасном характере инициирования и роста трещины (раскрытии по моде I) используются образцы в виде двухконсольной балки (ДКБ) и их растяжение в зажимах разрывной машины за края заданной трещины с определением усилия, которое необходимо для ее прорастания. Эти методы при испытаниях тонкостенных слоистых ПКМ требуют наклеивания специальных элементов для закрепления образца в зажимах разрывной машины. Испытать такие образцы при достаточно высокой трещиностойкости практически невозможно из-за отрыва закрепляющих элементов. Предлагаемый метод расклинивания образцов позволяет отказаться от использования как разрывной машины, так и приклеивания закрепляющих элементов.

Метод расклинивания для оценки межслоевой трещиностойкости слоистых ПКМ заключается в том, что в заранее подготовленную трещину в образце типа ДКБ вставляется клин, и при его продвижении вдоль трещины достигается ее критическое прорастание с раскрытием по моде I. После того, как трещина проросла на определенную величину, с помощью микроскопа фиксируются ее параметры: раскрытие трещины в точках контакта клина с поверхностями образующейся трещины и ее длина от этой точки до конца. Эти параметры, в сочетании с модулем упругости слоев ПКМ, позволяют, с помощью соотношения линейной упругой механики разрушения, рассчитать показатель межслоевой трещиностойкости – критическое значение интенсивности высвобождения упругой энергии при раскрытии трещины по моде I GIC. Данная методика является наиболее простой, доступной и перспективной для оценки межслоевой трещиностойкости слоистых полимерных композиционных материалов любой толщины при наиболее опасной моде инициирования и роста трещин.

## Определение температурно-временных параметров термостимулируемого эффекта памяти формы в слоистых полимерных композитах методом динамического механического анализа

Слюсарев А.А.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Резниченко Г.М.
МАИ, Москва
rulryuk@mail.ru

Слоистые полимерные композиционные материалы (ПКМ), в частности, углепластики на основе армирующих углеродных тканей и густосетчатых (отвержденных стеклообразных) полимерных матриц, обладают термостимулируемым эффектом памяти формы (ТС ЭПФ) - способностью обратимо изменять и восстанавливать форму при нагревании до температуры выше температуры стеклования (Тс), так называемой температуры конверсии (Тк) и фиксировать форму при охлаждении ниже Тс. Такие материалы являются перспективными с точки зрения создания соединительных элементов (шарниров) каркасов с высокой удельной

жесткостью и прочностью для трансформируемых (компактно складываемых и разворачиваемых) космических конструкций. Важнейшей проблемой при разработке и применении таких материалов является определение, с целью оптимизации ТС ЭПФ, температурно-временных параметров их нагревания (длительности, скорости и предельной температуры) и деформирования (напряжений и деформаций, необходимых для изменения формы и возникающих при ее восстановлении, а также предельной степени восстановления).

Данная работа посвящена разработке и апробировании методики быстрой оценки этих параметров с использованием компьютеризованной установки для динамического механического анализа (ДМА) и малоразмерных образцов слоистого углепластика на основе углеродной ткани и полиуретан-эпоксидного связующего, обладающего ТС ЭПФ. Оценка температурно-временных параметров нагревания и деформирования слоистого углепластика на установке ДМА проводится при трехточечном изгибе образцов в виде пластин длиной 40 мм, шириной – до 12 мм, толщиной – до 5 мм. Разработаны программы испытаний образцов в два этапа.

На первом этапе образец нагревается до Тк с заданной скоростью (10ОС/мин) и нагружается в режиме релаксации заданной нагрузкой (до 12 Н) с постоянным минимальным усилием прижатия индентора к образцу (0.05 Н). После достижения Тк (200ОС) и выдержке при этой температуре образец деформируется на заданную величину прогиба dL (4,4 мм), и прибор измеряет максимальное усилие деформирования (Fд) образца (0,95 Н). Деформированный образец для фиксации формы охлаждается до комнатной температуры без снятия нагрузки.

На втором этапе охлажденный образец в деформированном состоянии разгружается и нагревается со скоростью 10ОС/мин до Тк (200ОС) с выдержкой при этой температуре для самопроизвольного восстановления формы до прекращения изменения величины прогиба dL. Прибор записывает кинетику изменения усилия восстановления (Fв) и прогиба dL образца при постоянной Тк. Этот этап выполняется в стандартом режиме в выбранном диапазоне нагрузок от 0 до 12 Н. Экспериментально определенные напряжения, возникающие при восстановлении формы образцов заданного размера, были использованы для расчета соответствующих напряжений для других размеров образцов. Сравнение экспериментальных и расчетных данных показало, что погрешность при этом не превышает 7%.

Таким образом, получаемые на первом этапе испытаний результаты позволяют определять максимальные усилия, пересчитываемые в напряжения, необходимые для деформирования ПКМ с ТС ЭПФ при укладке трансформируемой конструкции при соответствующих температурно-временных режимах нагревания, а на втором – усилия (напряжения), возникающие при восстановлении, а также предельную степень восстановления их формы при соответствующих температурно-временных режимах нагревания.

1) J. Ivens, M. Urbanus, C. De Smet. Shape recovery in a thermoset shape memory polymer and its fabric-reinforced composites// eXPRESS Polymer Letters Vol.5, No.3 (2011) 254–261

2) Tiffany Williams, Michael Meador, Sandi Miller, Daniel Scheiman. Effect of graphene addition on shape memory behavior of epoxy resins// Society of Advanced Materials Processing and Engineering (SAMPE), 2012.

3) Jinsong, Leng & Lan, Xin & Du, Shanyi. Shape-Memory Polymer Composites// 2010, 203-232.

# Композиционные материалы на основе нанокристаллических полисахаридов

Сотникова Ю.С.
Научный руководитель — к.х.н. Демина Т.С.
МАИ, Москва
sotnikova_yulia94@mail.ru

Нанокристаллические полисахариды (НП) – высококристаллические наночастицы, получаемые кислотным гидролизом аморфных областей природных полисахаридов (крахмал, целлюлоза, хитин и т.д.), нашли применение в различных областях: от пищевой промышленности до создания интеллектуальных композиционных материалов. Наибольший интерес представляют нанокристаллическая целлюлоза (НКЦ) и нанокристаллический хитин (НКХ), которые обладают высокой анизометрией (отношение длины к диаметру), что дает возможность применять их в качестве функциональных наноразмерных наполнителей при создании композиционных материалов. Другим перспективным применением НП является создание полимерных микрочастиц со структурой ядро/оболочка. Такие композиционные микрочастицы можно получать методом испарения растворителя из эмульсий, в которых стабилизация границы раздела фаз осуществляется наночастицами, которые формируют оболочку микрочастиц, а ядро состоит из полимера, растворенного в дисперсной фазе.

Целью работы являлось исследование эффективности использования НКЦ и НКХ в качестве наноразмерных армирующих наполнителей при создании пленочных композиционных материалов, а также для получения полимерных микрочастиц со структурой ядро/оболочка.

Для исследования эффективности использования НП в качестве армирующих наполнителей были получены и исследованы композиционные пленки на основе различных полисахаридов и их производных, наполненных НКЦ и НКХ. Показано, что введение НП позволяет повышать деформационно-прочностные свойства композиционных пленок даже при небольшом содержании в полимерной матрице.

Композиционные полимерные микрочастицы, в которых оболочка состоит из НП, получали методом испарения растворителя из эмульсий типа масло/вода при постоянном перемешивании. В качестве дисперсной "масляной" фазы использовали раствор поли(L,L-лактида) в дихлорметане, а дисперсионная среда состояла из водных дисперсий НП. В процессе перемешивания граница раздела фаз была стабилизированы НП, которые после испарения дихлорметана из дисперсной фазы, образовывали оболочку полилактидных микрочастиц. Эффективность применения НП для создания таких микрочастиц определяется их способностью стабилизировать границу раздела фаз. Исследование НКЦ и НКХ показало, что способность к стабилизации границы раздела фаз зависит от их устойчивости к агрегированию при увеличении концентрации в водной дисперсионной среде. НКЦ при увеличении их концентрации в водной фазе с 0.1 до 1 мас.% образуют микроразмерные агрегаты, которые в отличие от наноразмерных форм целлюлозы не могут стабилизировать эмульсии. Исследование влияния размеров нанокристаллов на выход полимерных микрочастиц и их морфологию было проведено на примере использования наночастиц НКХ, выделенных из различных марок хитина и различающихся степенью анизометрии в два раза. Показано, что в обоих случаях выход стабилизированных НКХ полимерных микрочастиц увеличивается при увеличении концентрации нанокристаллов в водной дисперсионной среде. Однако при использовании НКХ с более высокой степенью анизометрии форма полимерных микрочастиц в процессе испарения растворителя остается сферической, что, вероятно, связано с более эффективной перестройкой слоя наночастиц, закрепленных на границе раздела фаз.

Таким образом, НП являются эффективными наполнителями для получения композиционных материалов, а также могут быть успешно использованы для создания полимерных мультифункциональных микрочастиц ядро/оболочка.

## Аналитическая оценка скорости докритического роста трещин в клеевых соединениях с использованием модели когезионной зоны

Устинов А.А.
Научный руководитель — доцент, д.т.н. Козлов Н.А.
МАИ, Москва
ustinershovskiy@yandex.ru

Широкое использование клеевых соединений (КС) деталей и узлов в авиа- космических конструкциях в разряд актуальных ставит задачу расчета их долговечности и, соответственно, выдачи гарантии надежной эксплуатации летательных аппаратов в течение установленного срока. Одни из современных методов оценки долговечности КС при статических и циклических нагрузках, меньших критических, базируются на макромеханическом подходе линейной упругой механики разрушения с использованием экспериментальных данных о докритическом подрастании трещины, так называемых K-v и G-v кинетических диаграмм. Для теоретического описания кинетики такого подрастания необходимо использовать микромеханический анализ процессов, происходящих вблизи кончика трещины, в так называемой когезионной зоне, с использованием физической модели, впервые предложенной Беренблаттом и устанавливающей соотношение между локальной отрывающей силой и деформацией КС вблизи кончика трещины. Эта модель позволяет рассчитывать длину когезионной зоны при заданных условиях нагружения трещины по известным характеристикам КС: значениям энергетического параметра трещиностойкости Gic, локальной адгезионной прочности σc и модулей упругости склеиваемых подложек.

В данной работе предлагается аналитическое полуэмпирическое решение задачи описания кинетики докритического подрастания трещины в образце КС в виде двухконсольной балки (ДКБ) в статических условиях при заданном раскрытии трещины по моде I и, соответственно, нагрузки на трещину, меньшей критической (Gi<Gic). Это решение основано на предположении, что докритическое подрастание трещины в этих условиях обусловлено постепенным разрывом физических и химических связей в нагруженной когезионной зоне КС под действием внешней среды, что приводит к уменьшению максимального значения локальной адгезионной прочности, т.е. сдерживающего рост трещины напряжения σc, и, соответственно, к докритическому подрастанию трещины за счет изменения длины когезионной зоны с постепенным уменьшением нагрузки на трещину.

В рамках решения поставленной задачи локальная адгезионная прочность σc представлена как функция времени, а изменение нагрузки на трещину в результате ее критического подрастания Gi – как функция длины трещины, что позволило с использованием соотношений модели Баренблатта получить аналитические выражения для кинетики подрастания трещины и изменения трещинодвижущей силы, обобщение которых дает выражение для расчета G-v диаграммы, связывающей трещинодвижущую силу и скорость докритического подрастания трещины, и используемой для оценки долговечности КС.

Таким образом, результаты работы позволяют расширить возможности применения физической модели когезионной зоны и использовать её, в сочетании с численными методами, для описания докритического роста трещины в КС любой геометрии, состава и характера разрушения.

# Разработка технологии керновых углеродных волокон на основе нефтяных пеков

Флотский А.А.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Бухаров С.В.
МАИ, Москва
flotskiyaa@gmail.com

Углеродные волокна благодаря высоким удельным показателям упруго-прочностных свойств, а также технологичности в изготовлении и переработке, занимают особое место среди армирующих волокон конструкционного назначения. Наиболее перспективным сырьем для производства углеродного волокна по совокупности технологических и экономических параметров являются нефтяные и каменноугольные пеки.

Формование высококачественного углеродного волокна на основе каменноугольных пеков из-за непостоянства состава сырья, наличия механических и химических примесей, а также канцерогенности, труднодостижимо. Поэтому актуальной задачей современной химической технологии является синтез нефтяных пеков и исследование процессов формирования структуры углерода, обеспечивающей в волокнах требуемый уровень физико-механических и термо-химических свойств.

В настоящее время использование волокнообразующих пеков на основе нефтяного сырья является единственным способом решения экологической проблемы в области производства углеродного волокна.

В ГНЦ РФ АО «ГНИИХТЭОС» для изготовления изотропного углеродного волокна на основе нефтяного сырья были изучены следующие процессы:

- Образование волокнообразующего пека путем дистилляции и поликонденсации заданной фракции (ТУ 6-05-1975-84) перегонки нефти (производитель –ООО «Ставролен» г. Буденовск) в инертной среде и вакууме при температуре до 400 °С;
- Расплавное формование волокон из опытных партий нефтяного пека;
- Перевод свежесформованного пекового волокна в неплавкое состояние методом термического окисления при температуре до 250 °С;
- Карбонизация окисленного пекового волокна в инертной среде при температуре до 1100 °С.

В результате были получены образцы углеродного волокна изотропной структуры (исследовалась методом оптической микроскопии в поляризованном свете) со следующими свойствами: диаметр – 30-80 мкм, прочность – 500-800 МПа, модуль упругости – 20-40 ГПа (физико-механические характеристики определялись на разрывной машине Instron), плотность – 1.6-1.8 г/см3 (определялась методом с использованием колонки с градиентом плотности) термоокислительная стойкость – до 530 ˚С (термогравиметрический анализ).

Полученное волокно будет использовано в качестве керна для высокопрочных жаростойких карбидокремниевых и борных волокон, используемых для армирования металломатричных и керамоматричных композиционных материалов конструкционного назначения.

На следующем этапе планируется проведение комплекса исследований по изготовлению непрерывных борных и карборундовых волокон путем нанесения из газовой фазы на полученное в данной работе углеродное волокно продуктов пиролиза бор- или кремнийсодержащих мономеров с перспективой апробации их использования в армировании высокотемпературных металло- и керамоматричных композиционных материалов для новых образцов авиационной и ракетно-космической техники.

# Модифицированные антифрикционные материалы на основе эпоксидных смол

Хасанова А.Р.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Галимов Э.Р.
КНИТУ-КАИ, Казань
miracle543543@mail.ru

К антифрикционным эпоксидным материалам для машиностроения предъявляются следующие требования: низкий коэффициент трения, отсутствие в составе дорогих компонентов, способность быстро прирабатываться и иметь низкий износ, высокая тепло-, водостойкость, не токсичность и безопасность в пожарном отношении, высокая прочность и твердость. Постоянно возрастающий интерес к практическому использованию эпоксидных композиционных материалов (ЭКМ) в машиностроении обусловлен сочетанием у них следующих факторов: упрощение и облегчение конструкции узлов трения, способность к замене во многих узлах техники цветных металлов и сплавов, легированных сталей и других традиционных конструкционных материалов, повышение показателей долговечности (ресурс, срок службы). Особенно перспективно применение ЭКМ для изготовления антифрикционных элементов узлов трения машин и механизмов в машиностроении и других отраслях промышленности. Эти детали работают в широком диапазоне скоростей и условий нагружения - динамические нагрузки и вибрации; действие абразивных и химически активных сред; недостаточная смазка.

Физико-механические свойства применяемых в трибосопряжениях полимеров не удовлетворяют всему диапазону нагрузок, возникающих в таких узлах, что является серьезным препятствием к их более широкому использованию в современных машинах в широком интервале условий их эксплуатации. Однако, за счет модификации можно целенаправленно управлять свойствами ЭКМ в зависимости от условий их эксплуатации.

Наряду с традиционными наполнителями в эпоксидные композиции вводят фурановые олигомеры, полиэтилен, кремний, органические смолы и другие специальные добавки при определенных сочетаниях и соотношениях, что значительно повышает твердость, жесткость, антифрикционные характеристики и износостойкость композиционных материалов.

Определенный интерес в этом аспекте в качестве модификатора эпоксидных полимеров может представлять волластонит, обладающий целым рядом ценных свойств, а именно: низкими значениями коэффициента водопоглощения, диэлектрической постоянной, вязкости, высокими износо- и термостойкостью. Это обусловлено его микроармирующими свойствами, за счет игольчатой формы частиц. Кроме того, волластонит имеет высокую твердость, низкую токсичность и не высокую стоимость.

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что показал, что изнашивание эпоксидных композитов с волластонитом существенно уменьшается. Волластонит снижает коэффициент статистического трения эпоксидных материалов и повышает их твердость, на основании чего можно ожидать роста износостойкости. Этот эффект имеет место при применении аминных отвердителей различной структуры и зависит от их химического строения и режимов отверждения. Его можно объяснить ростом гибкости межузловых участков эпоксидной сетки при одновременном увеличении ее густоты, и повышением термостабильности композиции при введении наполнителя.

Таким образом, модифицированные эпоксидные композиции представляют интерес как антифрикционные материалы для машиностроения.

# Графен. Его свойства и области применения

Цыденов К.А.
Научный руководитель — Коротун В.Л.
МАИ, Москва
kirillcydenov@yandex.ru

1. История создания графена. Ещё в 40 - 50-е годы двадцатого века были теоретические расчеты, которые показали что у однослойных материалов, таких как графен, будут уникальные свойства. Сам материал был открыт только в 2004 году, а в 2010 году была получена нобелевская премия за новаторские эксперименты по исследованию графена. 2. Графен представляет собой аллотропную модификацию углерода, объединенную в двумерную гексагональную кристаллическую решетку. 3. После экспериментов в 2010 году, последовал настоящий шквал исследований по графеновой тематике, в которые были вовлечены свыше 300 компаний, а в Европе был открыт институт посвященный только графену. 4. Одно из положительных свойств графена - он легкий как перышко и во много раз прочнее стали, к примеру: лист графена, площадью в один квадратный метр, способен выдержать нагрузку в 4 килограмма и при этом, вес его будет составлять всего: 0,077 грамма. Это свойство позволяет сделать на его основе композитный материал. И в дальнейшем использовать его в качестве основного материала для производства - самолетов, спутников и автомобилей. 5. Помимо своей огромной прочности, графен также обладает свойствами полезными в энергетике. При помощи графена возможно создать гибкие, дешевые и просвечивающие солнечные батареи, которые способны превратить фактически любую поверхность в источник электрический энергии. 6. Графен является превосходным материалом для изготовления имплантов, а благодаря проводимость можно производить органы и нервы управляемые электричеством 7. Поскольку графен непроницаем, даже для мельчайших частиц любых веществ, из него можно делать всевозможные фильтры и детекторы, сделав в слое графена дырки необходимого размера. Фильтры на основе графена способны отфильтровать любые частицы по размерам больше одного нанометра, их возможно применять для фильтрации воды, молочных продуктов или для разработки медикаментов. При помощи датчиков, выполненных из графена, можно обнаруживать инородные тела на уровнях, в десятки раз меньших, чем другие средства обнаружения. Их было бы возможно размещать внутри тела человека и обеспечивать врачей необходимой информацией. 8. Среди накопителей энергии наибольшей популярностью пользуются аккумуляторы запасающие электрическую энергию. Самые используемые и самые совершенные - литий-ионные, но они имеют множество недостатков, таких как долгая зарядка, малое количество циклов заряд-разряд и высокая стоимость. На основе графена научились делать конденсаторы, которые по удельной энергоемкости приближаются к литий-ионным аккумуляторам, способны быстро заряжаться, могут выдавать большие мощности, имеют в сотни раз большее количество циклов заряд-разряд, при этом дешевле и экологичней. 9. Среди всех перечисленных плюсов, кроется один большой недостаток - сложная технология производства, которая в данный момент не позволяет производить графен в промышленных масштабах.

Список литературы:

Алексенко А. Г. Графен. - М. : "Бином", 2014. - 7с.

Губин С. П., Ткачев С. В. Графен и родственные наноформы углерода. - М.: Изд-во «Либроком», 2012. -104с.

Новосёлов К. С. Графен: материалы Флатландии // УФН. - 2011. - Т. 181. - С. 1299-1311.

Гейм А. К. Случайные блуждания: непредсказуемый путь к графену // УФН. - 2011. - Т. 181. - С. 1284-1298.

Елецкий А. В., Искандарова И. М., Книжник А. А., Красиков Д. Н. Графен: методы получения и теплофизические свойства // УФН. - 2011. - Т. 181. - С. 227-258.

# Программа «EduPack» при выборе материала для корпуса самолета

Черноглазов П.А., Бобыкин В.В.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Черноглазова А.В.
КНИТУ-КАИ, Казань
pashaprostopasha@bk.ru

При решении задачи по выбору материала корпуса самолета была использована программа «EduPack», которая позволяет найти информацию о материалах, о его свойствах, производителях и стоимости на мировом рынке, за счет большой встроенной базы данных. Данный программный продукт предоставлен кафедре Материаловедения, сварки и производственной безопасности в образовательных целях в рамках проекта TEMPUS MMATENG для интеграции КНИТУ-КАИ в европейскую систему образования Болонского процесса.

С помощью программы «EduPack» можно построить диаграмму свойств материалов, при исследовании которой можно получать данные для изучения закономерностей. Диаграмма зависимости модуля упругости и плотности, к примеру, показывает, что каждый вид материалов занимает определенную область диаграммы: металлы, ячеистые материалы и т.д.

Диаграмма зависимости модуля упругости от плотности материалов позволила проанализировать свойства материалов и выбрать алюминиевые сплавы, титановые сплавы и CFRP - углепластик с эпоксидной матрицей. При сравнении материалов по пределу прочности (свыше 400МПа) и плотности нами был выбран CFRP т.к., плотность алюминиевых и титановых сплавов по сравнению с композитом на полимерной матрице очень высокая.

Минимальную рабочую температуру выбираем в интервале от -50 до -100ºС, т.к. учитывается температура в полетных слоях атмосферы.

Дальнейший анализ свойств CFRP показал, что углепластик с эпоксидной матрицей выдерживает отрицательные температуры до -100ºС.

CFRP имеет максимальную 140-250ºС и минимальную рабочую температуру -73,2 до -123ºС, длительную прочность (выносливость) 150-300 МПа, твердость по Виккерсу 10,8-21,5 HV, ударную вязкость 6,12-20 МПа.

Механические свойства композита зависят от геометрических характеристик и материала, т.е. от выбора матрицы и типа волокна, материала, от выбранного направления волокон композита. Например, при добавлении углерода или кевларовых нитей предел прочности очень сильно увеличивается, уменьшается плотность. Влияние окружающей среды на композит так же не проходит без следа, влажность, длительное использование в различных средах вызывают износ.

Однако процесс производства можно удешевить, используя материалы с более короткими волокнами.

Так же следует отметить, что при повреждении материала предел прочности сильно падает, а обнаружить и исправить повреждения крайне трудно.

Широкое применение в авиастроительной промышленности композиционных материалов (углепластиков) требует применения титана, т.к. он намного лучше алюминия соединяется с КМ и на 60% увеличивает жизнь летательных аппаратов. К высокой прочности добавляется и свойство незначительных деформаций при температурных изменениях, что повышает размерную стабильность конструкций.

Известно, например, что американский истребитель F22 состоит из титана на 39%, российский истребитель 5го поколения Т50 – на 25%, бомбардировщик – ракетоносец ТУ160 на 38%.

Масса самого большого пассажирского самолета в мире Аэробуса А380 – на 14% состоит из титана, а новейшего Боинга В 787 – уже на 18%. Если говорить об отечественных самолетах, то можно отметить, что семейство реактивных пассажирских самолетов Ан148, содержит 13 % титана, а лайнер Sukhoi Superjet 100 – 5%.

## Выбор терморегулирующих покрытий для оптической системы космического аппарата и технология нанесения

Чумак В.Н.
МАИ, Москва
valyachumak@mail.ru

Оптико-электронная аппаратура входит в состав бортовой радиоэлектронной аппаратуры космического аппарата, которая является его важнейшей частью и выполняетосновные задачи космического аппарата.

На срок службы и эффективность функционирования космического аппарата влияют факторы космической среды: воздействие вакуума, ультрафиолетового солнечного излучения, радиации. В процессе эксплуатации космического аппарата могут возникать такие эффекты, как: образование и накопление электростатического заряда, циклические тепловые нагрузки,формирование собственной ионно-газо-пылевой атмосферы вокруг космического аппарата. Онимогут приводить к таким нежелательным событиям, как: разрушение элементов аппарата при электростатическом пробое, деструкция материалов из-за воздействия вакуума, ультрафиолетового излучения, циклического воздействия высоких и низких температур, выход из строя оптических систем из-за попадания в них солнечного света или его отражения от поверхностей аппарата, снижение эффективности работы оптической системы из-за попаданиясвета, рассеянного частицами газопылевого облака, или из-за осаждения этих частиц на внешних оптических поверхностях аппарата.

Для эффективного функционирования космического аппарата требуется выбирать полимерные материалы, устойчивые к факторам космического пространства и не допускающие появления нежелательных для аппарата воздействий.

Для обеспечения заданных температурных режимов космического аппарата осуществляется выбор системы терморегулирования. В глубоком вакууме почти отсутствует конвективный теплообмен и теплопроводность среды, а обмен тепла с космической средой может происходить только за счет излучения. Выбор терморегулирующего покрытия для защиты оптических систем осуществляется исходя из способности покрытия поглощать, отражать и рассеивать лучистую энергию. Длязащиты наружных поверхностей выбирают покрытия, отражающие падающий свет и тепловое излучение от внешних источников, с целью сброса тепла в окружающее пространство и снижения температуры элементов конструкции космического аппарата. Длязащиты внутренних поверхностей оптических систем должны быть применены покрытия, поглощающие тепло от объектов с более высокой температурой и передающие его объектам с более низкой температурой, способствуя интенсификации теплообмена. Кроме того, эти покрытия должны поглощать солнечное излучение, отраженное от других поверхностей космического аппарата, не позволяя ему попасть на линзы оптических поверхностей. Таким образом, идеальные термооптические характеристики покрытий для защиты внутренних поверхностей оптической аппаратуры космического аппарата – это полное поглощение солнечного света ($\alpha s \rightarrow 1$) и высокий коэффициент теплового излучения ($\varepsilon \rightarrow 1$).

Помимо соответствия термооптических характеристик требованиям, для работы в космических условиях покрытие должно быть устойчиво к воздействующим факторам космической среды, сохранять свои свойства в заданном температурном режиме ииметь высокую поверхностную электрическую проводимость во избежание накопления

статического заряда. Кроме того, пленка терморегулирующего покрытия должна обладать высокой адгезией к конструктивному элементу, на который она наносится, и обладать высокой прочностью.

В данной работе представлены результаты:

- анализа лакокрасочных покрытий, разработанных и производимых различными организациями, и выбор покрытия с оптимальными характеристиками;
- испытаний покрытия на соответствие основным требованиям;
- разработок технологии нанесения покрытия, обеспечивающих сохранение требуемых характеристик.

## Исследование получения углеродных нанотрубок с помощью каталитического разложения углеродов

Юрченко Д.А.
МАИ, Москва
yur4enko.darya@ya.ru

В настоящий момент область исследований, относящихся к изучению, синтезу и использованию углеродных нанотрубок, является одним из ведущих направлений в нанотехнологиях. В процессе изучения данной модификации углерода, был выявлен ряд свойств, который обладает значительным прикладным потенциалом: высокая концентрация и подвижность носителей, высокая прочность и проводимость, гибкость и др.

Одним из самых практичных и популярных методов получения углеродных нанотрубок является термохимическое осаждение углеродосодержащего пара на плоскости нагретого металлического катализатора. У данного метода также есть название «метод химического осаждения из пара».

Смесь ацетилена C2H2 или метана CH4 с азотом, которая чаще всего используются в данном методе, пропускается через кварцевую трубку, далее ее помещают в печь, при температуре 700...1000 С. В трубке расположен керамический сосуд с металлическим порошком, в котором происходит распад углеводорода вследствие взаимодействия атомов газа с атомами металла. Этот процесс приводит к появлению на поверхности катализатора (в данном случае на металлическом порошке) фуллеренов и нанотрубок с внутренним диаметром до 10 нм и длиной от одного до нескольких десятков микрон. Геометрические характеристики нанотрубок напрямую зависят от таких условий, как: временя, температура, давление, вид инертного газа, показатель рассеянности и вид катализатора.

В составе идеальных электродуговых многостепенных нанотрубок (МНТ) присутствуют вложенные друг в друга соосные одностенные углеродные нанотрубки (ОНТ). В процессе образования МНТ в углеродной дуге, металлический катализатор исчезает из испаряемого графита. Интервалы между рядами в МНТ, как правило, довольно отличаются от правильных гомоцентрических окружностей, что можно сказать и про образование их формы (или нескольких форм). Данные факторы тесно связаны с условиями синтеза. Также существуют условия, при которых в объеме внутренней полости нанотрубки могут находиться атомы других веществ. Следовательно, метод получения наноконструкции сильно влияет на ее свойства, структуру, продолжительностть жизни (по истечению этого срока частицы окисляются).

# Опыт изготовления композитных образцов на основе объемно-армированных текстильных преформ

Яшин И.И.
Научный руководитель — Хилов П.А.
КНИТУ-КАИ, Казань
grishka994@yandex.ru

Основной целью данной работы является отработка технологии и изготовление образцов из полимерных композиционных материалов, изготовленных методами объемно-пространственного ткачества.

Основные задачи:

- Исследование технологических свойств объемно-армированных текстильных преформ: проницаемость, сжимаемость.
- Отработка технологического процесса пропитки тканых преформ методом RTM;

Для проведения ипытаний были изучены 6 типов переплетений объемно-пространственных 3D структур [1], [2]:

1. Группа 1 – ортогональная тип 1, ортогональная комбинированная тип 2;
2. Группа 2 - с попарно межслойным армированием тип 3, с попарно межслойным армированием и продольным слоем тип 4;
3. Группа 3 - с попарно межслойным комбинированным армированием тип 5, со сквозным межслойным армированием тип 6.

Каждая группа образцов объемно-армированных текстильных преформ была подготовлена для определенного вида испытания, поэтому имели форму ремней.

За основной техпроцесс была принята RTM-технология в жесткой двухсторонней формообразующей оснастке. Выбор в пользу данной технологической схемы обусловлен высокими требованиями к точности геометрических размеров изготавливаемых образцов материала. Использование двухсторонней формы при обжатии сухой армирующей преформы также упрощает мероприятия по достижению высоких значений коэффициента объемного наполнения волокном в конечном ПКМ.

Перед процессом пропитки связующим в полученной сухой 3D преформе необходимо знать такие взаимосвязанные технологические параметры как возможность компактируемости укладки для достижения параметров коэффициента наполнения (Vf) 55%, а так же измерения проницаемости укладки при заданном Vf.

Испытание на поперечное обжатие (компактируемость) подготовленного образца проводилось на универсальной испытательной машине Instron 5882 (100 кН), оснащенной крио-термокамерой, с использованием оснастки для сжатия диаметром 250 мм с шаровой опорой. Измерение деформации сжатия пакета проводилось с помощью датчиков линейных перемещений LVDT по трем точкам.

Полученные данные показывают, что заданное значение Vf=55% располагается в зоне перехода графика с пологого участка в более крутые. Эта зона отражает оптимальное отношение усилия при обжатие к величине коэффициента объемного наполнения волокном в преформе. Для достижения более высокого значения Vf, усилие, необходимое для этого, увеличивается в разы. Однако, дальнейшее обжатие может плохо сказаться на внутренней структуре армирующего материала. Возможно образование сильных изгибов нитей и частичного его разрушения.

Дальнейшим экспериментом, после определения необходимого усилия для достижения Vf=55%, было определение проницаемости при заданном коэффициенте наполнения арматурой

Для объемно-армированных структур возможны один основной способ пропитки армирующего материала «от края к краю» – так как образцы для экспериментов были подготовлены в виде лент, жгутов.

Экспериментальное значение проницаемости материала Kexp вычисляется по формуле (1).

, (1)

где $x_{ff,i}$ – координата распределения фронта, м;

$V_f$ – объемное содержание волокна;

$\Delta P_i$ – давление в точке, Па;

$\mu$ – вязкость жидкости, Пас;

$t_i$ – время пропитки, с.

На основании проведенного эксперимента по определению проницаемости был произведен расчет параметра проницаемости 3D преформ в продольном направлении K1.

Из полученных данных следует, что на проницаемость преформы влияет структура переплетения и коэффициент объемного наполнения. При увеличении Vf количество и размеры воздушных пор между волокнами уменьшается, что снижает проницаемость преформы. Если в структуре переплетения присутствуют прямые продольные волокна или большой процент нитей основы, это увеличивает значение величины проницаемости за счет капиллярного эффекта внутри нитей. Для более полного описания проницаемости и исследования влияния параметров 3D тканых преформ необходимо исследовать зависимость проницаемости от коэффициента объемного наполнения волокном для каждого типа переплетения в интересуемом диапазоне.

Цели и задачи данной работы достигнуты и полностью решены.

Данные исследование проводились в рамках договора между КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева и ПАО "ОДК-САТУРН".

Список используемой литературы:

1. М.М. Мартынова, Р.И. Сумарукова. Строение и проектирование тканей. Учебное пособие. Московский текстильный институт. 1980 г.

2. Бакунин А.Н. Технологические особенности выработки лент различных переплетений. – М.: Лёгкая индустрия, 1973. – 68 с.

# Секция №8.5 Материаловедение и технология металлических материалов

## Закономерности лазерного упрочнения титановых сплавов

Антонов Д.О., Чубуков А.И.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Муратаев Ф.И.
КНИТУ-КАИ, Казань
Dmitriy.antonov@outlook.com

Приведены результаты исследований по оценке лазерного воздействия на поверхностные слои титановых сплавов псевдо–α состава (ОТ4-1) и мартенситных сплавов ВТ6, ВТ8, ВТ8М и ВТ25. Использовались варианты различных структурных состояний: полного и не полного отжига, двойной мягкой закалки с последующей термической стабилизацией, включая глобулярно - пластинчатую структуру варианта технологии сплава ВТ8М [1,50,52]. В качестве источников упрочнения использовались лазерный комплекс «FMark-20 RL» и установка «Квант-16». Диапазон технологических параметров упрочнения соответствовал значениям характеристик соответственно: скорость обработки V=20, 50 и 100мм/сек, число проходов n=20, средняя выходная мощность N=20«ТЕМоо» (100%), f=21500 Гц, размер пятна в зоне обработки d=40мкм; напряжение накачки «Квант-16» U=1200…1500В; продолжительность импульса t ~2мс; плотность потока излучения qo~1…1,8х104Вт/см2; площадь пятна S ~10-7см2 и максимальная удельная энергия E~2…5х108Дж/см2.

Полученные результаты измерения микротвёрдости в зонах лазерного воздействия (ЗЛВ) свидетельствуют о существенном упрочнении сплавов в зависимости от режимов обработки образцов, их состава и исходного структурного состояния. Диапазон увеличения твёрдости у поверхности кратера лазерного пятна относительно микротвёрдости на участках объёмной обработки образцов составляет 1,25…2,85 раз и может достигать степени упрочнения у поверхности ЗЛВ сплава ВТ8~до 111%, ВТ6~ до 167%, ВТ25 до 33%. Пример микроструктуры с отпечатками измерения твёрдости в глубь образца сплава ВТ8 на участках ЗЛВ представлен на рис.1. Анализ структуры ЗЛВ позволяет предположить, что она состоит из зон термического влияния (ЗТВ) и оплавления (ЗО), последняя представлена участками непосредственного взаимодействия со средой (у поверхности кратера) и изолированного от взаимодействия участка ЗО. Рис 2 иллюстрирует изменение глобулярно - пластинчатой структуры варианта технологии сплава ВТ8М на участках ЗЛВ и степени упрочнения по результатам измерения микротвёрдости.

Литература

1. Муратаев Ф.И., Жаржанази М.А. Обеспечение конструкционной прочности титановых сплавов по критериям предельной пластичности и сопротивления усталости // Вестник КГТУ им.А.Н. Туполева. 2013 №1. С. 50-54.
2. Муратаев Ф.И., Клабуков М.А. Особенности лазерного ударного упрочнения сталей и титановых сплавов // Вестник КГТУ им.А.Н. Туполева. 2012 №4. С. 82-84.

# Улучшение эксплуатационных свойств крепёжных пар методом электролитно-плазменного бороазотирования

Белкин В.С.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Крит Б.Л.
МАИ, Москва
dfcz_001@mail.ru

Хорошо известно, что диффузионное насыщение азотом или бором малоуглеродистых сталей, методами электролитно–плазменной обработки качественно повышает их износостойкость. Диффузионный слой, состоящий из боридов, нитридов и твердого раствора диффундирующего элемента в стали, позволяет снизить массовый износ.

В данной работе проведены исследования повышения износостойкости крепёжных пар гайка-болт путём насыщения азотом и бором. Испытания пар гайка-болт проведены в множество повторяющихся итераций. Каждая итерация длилась 8,5 с и состояла из выкручивания болта из гайки и последующего вкручивания. Смещение гайки по оси болта достигало 9 мм с возвращением на исходную позицию при обратном движении. Таким образом, путь трения каждого элемента поверхности трения составлял 302,4 мм, единый для каждой итерации. В течении испытания на гайку производилась нагрузка 14,7 Н, направленная по оси болта в направлении выкручивания. Скорость скольжения достигала 35,6 мм/с. Каждые 240 мин фиксировалась убыль массы болтов и гаек Испытания завершали при выходе из строя пары трения (перекос болта приводил к невозможности дальнейшего вкручивания или выкручивания), либо когда гайка истиралась и не удерживалась на резьбе.

Обработка проводилась в цилиндрическом электролизёре диметром 110 мм. Электролит, представлял собой водный раствор хлорида аммония (10%), нитрата аммония (5%) и борной кислоты (3%). Напряжения обработки гаек выбирали по вольтамперным характеристикам бороазотирования отснятыми на цилиндрических стальных образцах. При этом напряжения обработки 160, 175, 190 В приводят к температурам модифицирования 800, 850 и 900 0С, соответственно.

Не прошедшая обработку крепёжная пара становится негоднойчерез 190 итераций испытания. Среди разных вариаций упрочнения болтов и гаек, лучшим запасом прочности обладает пара, состоящая из необработанного болта и гайки, бороазотированной при 190 В в течение 1 минуты. Обработанные при 160 и 175 В гайки, в паре с необработанными болтами приходят в негодность после 5600 и 5200 итераций соответственно. Стирание модифицированного слоя ведёт к резкому росту убыли массы за цикл к окончанию испытания. При напряжении обработки 190 В и длительности 1 минута, гайка и болт выдерживает 9100 циклов. Испытание закончилось полной потерей работоспособности резьбовой парой. При чём, упрочнённый слой на гайке, до конца не истёрся, о чём свидетельствует малый и почти неизменный массовый износ на протяжении всего испытания.

Выполненные исследования показали эффективность плазменно-электролитного бороазотирования, в качестве метода увеличения эксплуатационного ресурса крепёжной пары типа «гайка-болт». Бороазотированние гайки при 190 В протяжённостью 1 минута, позволяет повысить ресурс работы резьбовой пары болт-гайка в цикле вкручивание – выкручивание более чем в 45 раз.

# Исследования влияния неоднородности листовых материалов по толщине

Белоусов В.Б.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Типалин С.А.
Московский политехнический университет, Москва
1736113@rambler.ru

Экспериментальная часть

Цели:

Подготовить образцы к экспериментам;

Произвести отжиг 8 заготовок;

Произвести растяжение образцов на растяжной машине и подготовить их к последующему определению микротвёрдости;

После эксперимента произвести расчеты растянутых образцов. Необходимо построить кривые упрочнения для каждой толщины материала с последующей

Провести эксперименты по микротвердости по толщине листа на растянутых образцах, образцах после прокатки и образцах подверженной термической обработке (отжиг). (в стадии проработки).

Произвести сравнение полученных величин между собой как по толщине, так и по виду образца (после деформации, после производства (прокатки) и отожженный). (в стадии проработки)

Имеющийся материал:

Сталь 08пс.

Толщины:

-0,5 мм;

-0,7 мм;

-1,5 мм;

-3 мм.

Ход эксперимента:

Закрепить стальную полосу в прихватки, производить растяжение и регистрировать силу вместе с показаниями трех индикаторов.

Необходимо произвести растяжение образцов стали, удлинив их на 28%.

Аппроксимация кривых

Самыми подходящими для аппроксимации были «степенная» и «логарифмическая» аппроксимации. Учитывалось 4 знака после запятой. Другие способы (линейная, квадратичная, кубическая, показательная, гиперболическая, экспоненциальная) аппроксимации не давали такой точности получаемых графиков.

Общая аппроксимация

Степенная аппроксимация:

[y=501,4709x]^0,1357

Коэффициент корреляции – 0,8244;

Коэффициент детерминации – 0,6796;

Средняя ошибка аппроксимации – 9,77%.

Логарифмическая аппроксимация:

y=274,3130+8,1461lnx

Коэффициент корреляции – 0,7899;

Коэффициент детерминации – 0,6240;

Средняя ошибка аппроксимации – 10,92%.

Аппроксимация кривой с толщиной 3 мм

Степенная аппроксимация:

[y=579,7899x]^0,238

Коэффициент корреляции – 0,9986;
Коэффициент детерминации – 0,9972;
Средняя ошибка аппроксимации – 0,55%.
Логарифмическая аппроксимация:
y=266,2838+7,6828lnx
Коэффициент корреляции – 0,7899;
Коэффициент детерминации – 0,6240;
Средняя ошибка аппроксимации – 0,71%.
Аппроксимация кривой с толщиной 1,5 мм
Степенная аппроксимация:
〖y=490,1135x〗^0,1159
Коэффициент корреляции – 0,8574;
Коэффициент детерминации – 0,7351;
Средняя ошибка аппроксимации – 8,1%.
Логарифмическая аппроксимация:
y=267,8249+19,7507lnx
Коэффициент корреляции – 0,8290;
Коэффициент детерминации – 0,6872;
Средняя ошибка аппроксимации – 9,32%.
Аппроксимация кривой с толщиной 0,7 мм
Степенная аппроксимация:
〖y=506,1733x〗^0,1599
Коэффициент корреляции – 0,9557;
Коэффициент детерминации – 0,9134;
Средняя ошибка аппроксимации – 6,34 %.
Логарифмическая аппроксимация:
y=252,6889+7,0071lnx
Коэффициент корреляции – 0,9310;
Коэффициент детерминации – 0,8667;
Средняя ошибка аппроксимации – 8,61%.
Аппроксимация кривой с толщиной 0,5 мм
Степенная аппроксимация:
〖y=582,7315x〗^0,1438
Коэффициент корреляции – 0,9240;
Коэффициент детерминации – 0,8537;
Средняя ошибка аппроксимации – 7,72%.
Логарифмическая аппроксимация:
y=296,8959+8,2318lnx
Коэффициент корреляции – 0,8960;
Коэффициент детерминации – 0,8029;
Средняя ошибка аппроксимации – 9,63%.

## Определение температуры при сварке

Низамов Р.А., Мухамадеев И.М.
Научный руководитель — к.т.н. Беляев А.В.
КНИТУ-КАИ, Казань
alexey-beljaev@mail.ru

В современном промышленном производстве (авиа- и машиностроении, приборостроении и др.) широко применяются неразъемные соединения. Среди них

наибольшее применение находит сварка. В процессе выполнения данного технологического процесса различные зоны сварного соединения нагреваются до высоких температур, которые оказывают влияние на структуру и свойства после охлаждения.

В расчетах тепловых процессов при сварке применяются уравнения и формулы, подробно описанные в работах Фролова В.В. [1] и других ученых [2].

Для экспериментального определения температуры при сварке применяются различные средства измерения, среди которых термопары, термощупы, термокраски, бесконтактные средства (оптические пирометры, тепловизоры) и др. Однако, правильным следует считать подход, при котором используются как расчетные, так и экспериментальные методы. Современные методы позволяют определять температуры в широком диапазоне – 270 до + 1760 °С и выше.

Применительно к сварочным процессам [3], с практической точки зрения, наиболее важным является определение температуры в зоне термического влияния, определения ее ширины и скоростей охлаждения и др. Отметим, что исследование температурных полей позволяет прогнозировать структуру металла, выбрать оптимальные параметры режима сварки, виды и режимы термической обработки для улучшения служебных свойств. Полученные расчетом данные подтверждаются экспериментальными методами. Для этого часто необходимо измерение температур сразу с нескольких датчиков. Для преобразования и обработки сигнала с них возможно применение программно-аппаратных средств разработки типа «Arduino». Они позволяют получать значения температуры с частотой дискретизации 10 кГц. Функция «analogRead» позволяет опрашивать сигналы с 6 каналов.

Таким образом, для подтверждения расчетных данных целесообразно использовать экспериментальные методы определения температуры. К ним относятся как простые и быстрые методы термокарандашей и термокрасок, так и сложные системы на основе многоразрядных аналогово-цифровых преобразователей.

Библиографический список

1. Теория сварочных процессов: Учеб. для вузов по спец. «Оборуд. и технология сварочн. пр-ва» / В.Н. Волченко, В.М. Ямпольский, В.А. Винокуров и др.; Под ред. В.В. Фролова. – М.: Высш. шк., 1988. 559 с.: ил.

2. Теория сварочных процессов: Учебник для вузов / А.В. Коновалов, А.С. Куркин, Э.Л. Неровный, Б.Ф. Якушин; Под ред. В.М. Неровного. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 752 с.

3. Введение в сварочные технологии: учебное пособие. /С.Н. Козловский/ – СПб.: Издательство «Лань», 2011. – 416 с.

## Анализ процессов, протекающих при сварке

Батраков М.П.
Научный руководитель — к.т.н. Беляев А.В.
КНИТУ-КАИ, Казань
alexey-beljaev@mail.ru

В настоящее время для соединения материалов в промышленности и строительстве широко применяется сварка [1]. Однако процесс сварки весьма сложен. Среди процессов, протекающих при сварке, – физические, химические, механические и др. Дисциплина, которая описывает данные процессы, носит название «Теория сварочных процессов» [1, 2]. В рамках нее классифицируются процессы при сварке; рассматриваются физико-химические процессы в дуговом разряде, тепловые процессы, физико-химические и металлургические процессы при сварке, деформационные процессы и превращения в металлах при сварке и др. Многие способы сварки основаны на тепловом воздействии на металл. В этом случае учитываются тепловые режимы сварки, предварительный и сопутствующий подогрев при

сварке, теплоотдача, охлаждение и др. Указанные процессы вызывают различные по природе явления в материале деталей: изменение структурного состояния и свойств. Для описания этих процессов применяются уравнения и формулы, описанные в разделе «Тепловые процессы при сварке», а также экспериментальные методы и средства измерения.

Также непосредственное к задачам сварки отношение имеют физико-химические и металлургические процессы при сварке. Это различные химические реакции в расплавленном материале (окисление, рафинирование, легирование и др.). Эта группа процессов также оказывает влияние на структуру и служебные свойства сварного соединения. Ряд указанных процессов рассматривается как часть материала химической термодинамики и физической химии.

При сварке плавлением в расплавленном металле и после охлаждения протекают термодеформационные процессы из-за неравномерного нагрева, вследствие действия остаточных напряжений и др. Данная группа явлений определяет эксплуатационные свойства сварных соединений и конструкции в целом.

Таким образом, сварка представляет собой комплекс различных по природе процессов, которые во многом определяют структуру и свойства сварных соединений и конструкции. К ним относятся тепловые, металлургические, физико-химические процессы и др. Они широко рассматриваются в курсах «Теория сварочных процессов», «Сварочные процессы и оборудование», изучаемых студентами, обучающимися по направлению подготовки «Металлургия сварочного производства», «Оборудование и технология сварочного производства» и др.

Библиографический список

1. Введение в сварочные технологии: учебное пособие. /С.Н. Козловский/ – СПб.: Издательство «Лань», 2011. – 416 с.

2. Теория сварочных процессов: Учеб. для вузов по спец. «Оборуд. и технология сварочн. пр-ва» / В.Н. Волченко, В.М. Ямпольский, В.А. Винокуров и др.; Под ред. В.В. Фролова. – М.: Высш. шк., 1988. 559 с.: ил.

3. Теория сварочных процессов: Учебник для вузов / А.В. Коновалов, А.С. Куркин, Э.Л. Неровный, Б.Ф. Якушин; Под ред. В.М. Неровного. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 752 с.

## Оценка износостойкости наплавочных систем на основе железо-хром-никель и железо-никель-кобальт

Бондаренко Д.О.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Фомичева Н.Б.
ТулГУ, Тула
diabond2018@yandex.ru

Оценка износостойкости наплавочных систем на основе железо-хром-никель и железо-никель-кобальт

Бондаренко Д.О.
Научный руководитель: доцент, к.т.н. Фомичева Н.Б.
ФГБОУ ВО Тульский государственный университет
Кафедра физики металлов и материаловедения
E-mail: nbf62@yandex.ru

Одним из важных эксплуатационных свойств наплавочных материалов, работающих в условиях интенсивного изнашивания, является износостойкость. Установление связи между изнашиванием материала и характеристиками механических свойств, а также структурным состоянием наплавки давно привлекает исследователей. Нахождение такой связи значительно упростило бы выбор материалов для разных условий работы.

Известно, что для действующих в парах трения механизмов изнашивания в качестве параметров работоспособности принимают в расчет геометрические параметры покрытия (толщина покрытия и глубина диффузионной зоны), структурные характеристики (пористость, фазовый состав, элементы субструктуры), физико- механических свойств (макро – и микронапряжения, микротвердость, а также прочность сцепления покрытия с основой и другие. Необходимо учитывать, что физико-механические свойства материалов основы и частиц второй фазы отличаются, что предопределяет механизм зарождения и роста трещины в процессе изнашивания.

Существовало мнение о тождественности высокой твердости с высокой износостойкостью, однако разными исследователями было получено, что не всегда твердость определяет износостойкость материала. Только комплексная оценка структуры и свойств позволяет судить о действительном поведении наплавленного металла при изнашивании.

Термическая обработка, которая в значительной степени изменяет микростроение (количество, расположение, форма, величина, степень легирования) сплавов, во многом контролирует эксплуатационные характеристики изделия с наплавкой.

В условиях абразивного износа феррит по сравнению с аустенитом и тем более с мартенситом является менее износостойкой основой. Структура наплавочных слоев является сложной и содержит включения различной морфологической природы. Являясь более вязким аустенит удерживает карбиды и включения тем самым повышает относительную износостойкость. Геллер Ю.А. считает, что присутствие в материале около 20% аустенита способствует повышению износостойкости. Вследствие этого наиболее благоприятными для изнашивания являются сочетания аустенитно-мартенситной структуры – сочетание этих двух фаз способствует тому, что одна из них повышает износостойкость, а другая способствует удержанию различных твердых частиц в матрице.

Сопоставление мартенситно-стареющих сталей с высокоуглеродистыми показало, что применение МСС в качестве изноустойчивого материала перспективно, так как МСС превосходят высокоуглеродистые по сопротивлению развития трещины на 20%. Наиболее высокой износостойкостью отличаются наплавочные системы железо-хром-никель и железо-кобальт-никель, что объясняется их значительной твердостью, теплостойкостью, а также способностью образования на поверхности прочных оксидных пленок, препятствующих схватыванию.

## Сплавы с памятью формы

Вагапов Т.И., Канг Джимоон
Научный руководитель — Ильинская О.И.
МАИ, Москва
Timurvagapov@inbox.ru

Для того чтобы спутник вышел на заданную орбиту и выполнял свои функции, необходим источник снабжения электроэнергией. Поэтому для бесперебойного снабжения спутника энергией сразу после выхода спутника на орбиту в первую очередь должно произойти развертывание панелей солнечных батарей. Для этого устройство отделения, соединяющее корпус спутника с панелью солнечных батарей, должно сработать за необходимый промежуток времени и с учетом килограмм-силы. Для оценки характеристики мы использовали активатор на основе сплава с памятью формы (SMA). Тестирование измерений времени срабатывания отделения было проведено с использованием точного снабжения энергией до 0.01 с, платы сбора данных и датчика Холла.Тестирование проводилось с пятиминутными интервалами для того, чтобы актюатор на основе сплава с памятью формы (SMA) возвращался в свою изначальную форму. Одной из проблем

устройства отделения, срабатывающего при пироударе, является влияние сильного импульса на корпус спутника, возникающий при зажигании пороха и взрыве. Такой импульс может привести к несрабатыванию спутника. В целях проведения тестирования к устройству отделения и столу контроллера вибрации был прикреплен акселерометр. При выходе на орбиту искусственный спутник попадает в условия сильнейших изменений в температуре, а также вакуумного состояния. В случае попадания металла в вакуум газовые молекулы, находящиеся внутри металла, отделяются, что приводит к изменению металла и повреждениям поверхности. Чтобы избежать этого, мы использовали материал AL70, который отличается низким газовыделением, и титановый сплав для корпуса устройства.По сравнению с аналогичными устройствами отделения, разработанными в других странах, устройство, представленное в данной статье, отличается более низкими сжимающими усилиями и более длительным промежутком времени отделения.

## Влияние температуры деформации на структуру и свойства сплава ТН1

Виноградов Р.Е., Запалова А.В., Борисов А.А.
Научный руководитель — профессор, к.т.н. Гусев Д.Е.
МАИ, Москва
r_vinogradov@mail.ru

Сплавы на основе никелида титана обладают особыми функциональными свойствами, такими как эффект запоминания формы (ЭЗФ) и сверхупругость (СУ). Механическое поведение сплавов с ЭЗФ сильно отличается от поведения конструкционных материалов и зависит от температуры испытаний.

В данной работе было исследовано влияние деформации сжатием (осадку образцов) при различных температурах на свойства и структуру сплава ТН1, имеющего химический состав согласно ТУ 1-809-394-84.

Исследования проводили на цилиндрических прутках сплава ТН1 путем осадки при температурах от 20 до 800°С с интервалом 50 - 100°С и усилием до 100 кН.

Так как максимальное усилие сжатия было ограничено техническими характеристиками испытательной установки, а в процессе осадки площадь образца увеличивается, то напряжения разрушения образцов достигались только при нормальной температуре. При более высоких температурных испытаниях разрушения образцов не наблюдалось.

Во время испытаний при комнатной температуре кривые текучести имеют низкое значение предела текучести и значительное упрочнение при деформации. При напряжениях свыше 1200 МПа происходит разрушение образца путем образования трещины под углом 45° к его оси. Повышение температуры деформации до 300°С вызывает рост предела текучести и снижение деформационного упрочнения. Увеличение пластичности материала при этих температурах приводит к тому, что образцы не разрушаются при максимальных усилиях сжатия, реализуемых в этом эксперименте.

Такое поведение материала при деформации в интервале температур от 20 до 300°С связано с реализацией сдвигового механизма пластической деформации.

На начальном этапе при нагружении при нормальной температуре реализуется двойникование мартенсита, а при температурах 100-300°С его образование из В2-фазы. После исчерпания сдвигового механизма формоизменение материала протекает дислокационным путем. Однако, если исходная структура материала перед началом деформирования была представлена В2-фазой (при температурах выше 20°С), то в процессе деформирования образуется полностью или частично мартенситная структура.

По причине того, что формоизменение материала с подобной структурой по дислокационному пути затруднено, протекает деформационное упрочнение. С увеличением температуры испытаний механическая стабильность аустенита возрастает, поэтому

повышаются напряжения мартенситного превращения и снижается деформационное упрочнение.

Во время деформации в интервале температур 400-500°С кривые текучести имеют более привычный вид – напряжения интенсивного течения материала слегка больше предела текучести. Это говорит о том, что в материале протекают процессы динамической полигонизации, из-за которой снижается деформационное упрочнение материала. Но при этом, уровень сопротивления деформации в данном интервале температур остается довольно высоким, если сравнивать с более высокими температурами. Это связано с тем, что при температурах близких к 450°С В2-фаза распадается, и образуются богатые никелем интерметаллиды Ti3Ni4 и Ti2Ni3, которые очень дисперсны, и вызывают упрочнение материала. Выше 500°С происходит растворение интерметаллидов в В2-фазе, это приводит к разупрочнению сплава ТН1. Выше температур 550°С деформационное упрочнение не наблюдается.

Таким образом, кривые текучести при сжатии сплава ТН1 в зависимости от температуры испытаний можно выделить 3 группы:

1. При температурах деформации до 300°С наблюдается низкий предел текучести сплава и интенсивное деформационное упрочнение. Такое изменение свойств связано с протеканием в сплаве одновременно двух основных процессов. Во-первых, при нагружении происходит мартенситное превращение В2->19'. Во-вторых, в сплаве происходят процессы динамического возврата, что приводит к снижению деформационного упрочнения.

2. В интервале температур испытания 400 – 500°С мартенситного превращения при деформации не происходит, а динамический возврат развивается более полно. Это должно вызывать снижение предела текучести и деформационного упрочения сплава. Однако при этих температурах в сплаве происходит распад В2-фазы с образованием интерметаллидов типа Ti3Ni4 и Ti2Ni3. Упрочнение материала несколько замедляет уменьшение сопротивления деформации и повышение пластичности с ростом температуры.

3. При температурах деформации свыше 550°С не наблюдается значительного упрочнения сплава вследствие развития в нем процессов динамической рекристаллизации и растворения богатых никелем интерметаллидов. Материал обладает высоким запасом пластичности.

## Текстура и анизотропия механических свойств листов сплавов 1469 и 1441

Гордеева М.И.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Бецофен С.Я.
МАИ, Москва
pumochka90@yandex.ru

Одной из серьезных проблем применения алюминий-литиевых сплавов является выраженная анизотропия свойств, которую связывают с особенностями формирования текстуры и фазового состава в листах среднепрочного ресурсного сплава 1441 и высокопрочного сплава В-1469, которые рассматриваются как перспективные для использования в СИАЛах и в гибридных слоистых верхних и нижних панелях крыла с частичным армированием СИАЛом. Для решения этой проблемы проведено исследование формирования текстуры и анизотропии механических свойств в тонких листах сплавов 1441 (0,3 мм) и В-1469 (1,5 мм).

Текстура 1,5 мм листа сплава В-1469 характеризуется тремя основными компонентами: (1) повернутой текстурой «латуни» (110) ; (2) “S” –текстурой (135) и текстурой «меди» (113). Соотношение этих компонент меняется по сечению листа. На поверхности превалирует “S” – текстура, а в медианном сечении – текстура «латуни». Текстура 0,3 мм фольги из сплава

1441 слабо выражена и ее тип сильно отличается от типичных текстур прокатки ГЦК сплавов.

Для объяснения причин заметной анизотропии прочностных свойств в листах сплавов рассчитывали из количественных текстурных данных ориентационные факторы упрочнения – факторы Закса, которые равны обратным факторам Шмида и соответствуют модели деформации поликристалла по Заксу (все кристаллиты испытывают одинаковые напряжения, совпадающие с приложенными напряжениями к образцу).

Факторы Закса, рассчитанные для долевого и поперечного направлений должны совпадать с экспериментальными в том случае, если анизотропия свойств обусловлена только кристаллографической текстурой матрицы. Для сплава В-1469 отношение факторов Закса составило 1,07, а для сплава 1441 - 0,99.

При анализе влияния текстуры на анизотропию прочностных свойств обычно ограничиваются расчетами ориентационных факторов на основе количественных данных о текстуре твердого раствора. В работе [1] при интерпретации анизотропии прочностных свойств сплава системы Al-Mg-Li-Sc рассматривали также вклад в анизотропию свойств δ'-фазы, при этом для упорядоченной по типу L12δ'- фазы вычисляли ориентационные факторы для скольжения по системе {001}<110>, в то время как для твердого раствора ориентационные факторы рассчитывали для системы скольжения {111}<110>.

Наши расчеты факторов Закса для скольжения по системе {001}<110>для δ'- фазы при условии ее когерентности с матрицей (значения полюсных плотностей для δ'- фазы в расчетах приняты такими же как и для матрицы) показали, что отношения факторов Закса для листов сплавов В-1461 и 1441 составляют 0,88 и 1,05. Сопоставление этих значений с экспериментальными характеристиками анизотропии показывает, что для сплава В-1461 эти значения позволяют скорректировать различия между экспериментальными значениями анизотропии свойств и текстурными данными. Отношение факторов Закса для скольжения по системе {111}<110>, характерной для неупорядоченной матрицы дает завышенную величину анизотропии (1,07) по отношению к экспериментальной анизотропии (1,05). Поэтому низкая величина этого отношения для скольжения по системе {001}<110> (0,88) для δ'- фазы с учетом ее объемной доли (~8%,) дает величину анизотропии близкую к экспериментальной, если воспользоваться принципом аддитивности.

Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России ГЗ №11.1989.2017/ПЧ.

Список использованных источников.

1. Ильин А.А., Захаров В.В., Бецофен М.С., Осинцев О.Е., Ростова Т.А Текстура и анизотропия механических свойств сплава Al-Mg-Li-Zn-Sc. Металлы, 2008, №5, с.57-65.

2. Бецофен С.Я., Антипов В.В., Серебренникова Н.Ю., Долгова М.И., Кабанова Ю.А. Исследование фазового состава, текстуры и анизотропии свойств листов из сплавов системы AL–Cu–Li–Mg Деформация и разрушение материалов. 2017. № 1. С. 24-30.

## Влияние температуры нагрева и скорости охлаждения на структуру и свойства горячекатаных прутков из высокопрочного сплава ВТ16

Жидович А.О., Иванов А.Е., Кавченко Е.В.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Скворцова С.В.
МАИ, Москва; Минск, Беларусь
L10012012@ya.ru

Сплав ВТ16 относится к высокопрочным (α+β) – сплавам, но отличается высокой технологичностью. Он хорошо деформируется не только в горячем, но и в холодном состояниях, что обусловлено не только (α+β) – структурой, но и невысоким содержанием алюминия (до 3,5%). Хотя из сплава ВТ16 можно изготавливать почти все виды

полуфабрикатов, основная часть продукции из него — прутки и проволока, полученные прокаткой или волочением. К структуре прутков, предназначенных для изготовления деталей крепления, предъявляются довольно строгие требования: она должна быть дисперсная и однородная. Помимо этого, предъявляются повышенные требования к геометрическим размерам прутков и качеству их поверхности. Как правило, они имеют более высокую плотность. В России из прутков сплава ВТ16 производятся болты методами холодной высадки и редуцирования, но до диаметра М10. Производство прутков из сплава ВТ16 для изготовления крепежа диаметром до М16 холодной деформацией не имеет мировых аналогов.

В данной работе было проведено исследование по влиянию температуры нагрева и скорости охлаждения на структуру и свойства горячекатаных прутков из высокопрочного сплава ВТ16. Исследования проводились на образцах, вырезанных из прутков, полученных ковкой и прокаткой при температуре 820С, диаметром 16, 15 и 14 мм из слитка сплава ВТ16 (Ti-3Al-4,5V-5,0Mo).

Нагрев образцов проводился до температур 680-790С и охлаждение осуществлялось на воздухе и с печью различной скоростью охлаждения (охлаждение на воздухе, охлаждение с печью). При термической обработке в интервале температур от 680 до 730С количество α-фазы практически не изменяется, по причине того, что при низких температурах в β матрице медленно проходят процессы зарождения и роста α-фазы. Поэтому скорость охлаждения незначительно влияет на изменение структуры и твердости образцов. При повышении температуры до 790С для образцов, охлажденных на воздухе, идут в основном не процессы роста α-фазы, а образование новой в β матрице. Это приводит к увеличению количества α-фазы, что приводит к увеличению твердости от 26,5 до 32,5 HRC. Для образцов, охлаждённых в печи, наблюдается в основном рост частиц первичной α-фазы в интервале температур от 730 до 760С, что приводит к уменьшению твердости от 26,5 до 24 HRC. В интервале 760 - 790С процессы зарождения начинают преобладать над процессами роста, за счет чего наблюдается небольшое увеличение твердости от 24 до 26,5 HRC.

Таким образом, в результате проведённого исследования было определено, что самая низкая твердость наблюдается у образцов, охлажденных с печью, так как при медленном охлаждении в структуре формируется равновесная (α+β) – структура.

## Влияние химического состава на технологическую пластичность деформированных полуфабрикатов из сплава ВТ35

Журбина Е.В., Орлов А.А., Степушин А.С.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Скворцова С.В.
МАИ, Москва
zhurbina.ek1@yandex.ru

В настоящее время развитие современной науки идёт по пути повышения удельных прочностных характеристик высоконагруженных конструкций, в частности крепежных элементов, сварных конструкций и плетеных силовых каркасов за счет использования высокопрочных титановых сплавов.

Детали крепления относятся к ответственным изделиям авиационной техники массового производства. Поэтому они должны иметь высокую технологическую пластичность при комнатной температуре и хорошие эксплуатационные свойства готового изделия. Исходя из этого наиболее перспективными титановыми сплавами для получения прутков и проволоки для изготовления высокопрочных деталей крепления и плетеных силовых каркасов являются псевдо-β сплавы. Одним из таких сплавов является сплав ВТ35 (Ti-3Al-15V-1Mo-3Cr-3Sn-1Zr-0,4Nb).

Отечественный сплав ВТ35 является аналогом зарубежного сплава Ti-15-3 (Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn). Сплав ВТ35 в отличие от сплава Ti-15-3 дополнительно легирован небольшим количеством молибдена и циркония, которые обеспечивают дополнительное упрочнение матричного β-раствора. Раннее проведённые исследования по влиянию нейтральных упрочнителей на структуру и свойства (α+β)-сплава ВТ16, показали, что их введение в количестве около 1 масс.%, практически не сказывается на технологическую пластичность при повышенных температурах, но оказывает существенное влияние на неё при комнатной температуре [1].

В данной работе была проведена оценка влияния процентного содержания легирующих элементов в сплаве ВТ35 на деформационную способность и комплекс механических свойств при комнатной температуре с целью определения оптимального химического состава. Исследования проводили на полуфабрикатах трех партий сплава ВТ35, отличающихся содержанием основных легирующих элементов, но лежащие в интервале паспортного состава сплава (2 - 4%Al, 14 - 16%V, 2 - 4%Cr, 2 - 4%Sn, 0,5 - 2,0%Mo, 0,5 - 2,0%Zr, 0,01 - 0,4%Nb) ([Mo]экв состав 2 >[Mo]экв состав 3 >[Mo]экв состав 1). Состав 1 содержит до 3% алюминия, среднее количество ванадия, хрома и олова и минимально допустимое количество молибдена, циркония и ниобия. Сплав ВТ35 данного состава, по количественному содержанию основных легирующих элементов, близок к составу американского сплава Ti-15-3, который хорошо деформируется в горячую и в холодную. В составе 2 все легирующие элементы введены в количестве ближе к верхнему допустимому пределу. Состав 3 по процентному содержанию легирующих элементов занимает среднее положение между составом 1 и составом 2.

Для оценки технологической пластичности при комнатной температуре из прутков трёх составов вырезались образцы для определения предельной степени сжатия при осадке. Испытания завершали при достижении максимально возможного развиваемого установкой усилия или досрочно прекращали при появлении трещин на боковой поверхности образца.

Проведенные исследования показали, что предел текучести (σт, МПа), а следовательно, и предельная степень деформации (σпр, %) при осадке возрастает с уменьшением молибденового эквивалента сплава. Так, самый высокий предел текучести (1164 МПа) и низкую технологическую пластичность (34%) имеет сплав ВТ35 состава 2. Это связано с его сильным твердорастворным упрочнением легирующими элементами. Составы 1 и 3 имеют значительно более низкие значения предела текучести (1046 МПа и 1088 МПа) и соответственно лучшую технологичность при комнатной температуре (55 % и 50%)

На исследуемых образцах не были достигнуты минимально допустимые значения предельной степени деформации, необходимой для получения элементов крепления в холодную. Это обусловлено недостаточно полной проработкой литой структуры, т.к. исследования проводились на прутках, полученных только ковкой из двухсотграммовых слитков. Более хорошая проработка структуры в процессе пластической деформации при переходе на массивные образцы, должна будет обеспечить требуемые значения характеристик.

Таким образом можно сделать вывод, что для повышения технологической пластичности сплав ВТ35, должен содержать не более 3% алюминия; содержание основных β-стабилизаторов и олова не должно превышать среднего значения (не более 15%V, 3%Cr, 3%Sn), а содержание молибдена, циркония и ниобия должно быть ближе к нижнему пределу.

Литература

1. Скворцова С.В. Влияние дополнительного легирования нейтральными упрочняющими элементами на структуру и свойства (α+β)-титанового сплава / Скворцова С.В., Гвоздева О.Н., Шалин А.В., Ручина Н.В., Володин А.В. // Титан. 2017, №3 - с. 32 - 36

# Исследование склонности к трещинообразованию при сварке алюминиевого сплава 1151

Земцова Я.С., Соловьева И.В., Буряковская А.А.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Давыденко Л.В.
Ступинский филиал МАИ, Ступино
Yana.zemtsova@inbox.ru

Актуальность изучаемой темы связана с тем, что жаропрочные свариваемые сплавы системы Al-Cu-Mg являются перспективными материалами для изделий новой техники, работающих в условиях повышенных температур и нагрузок. Для формирования структуры сварного соединения и основы сплава, которая обеспечивает повышение служебных характеристик, применяют различные режимы сварки и термической обработки. Цель данной работы: определение склонности к трещинообразованию при сварке алюминиевого сплава 1151.

Сплавы системы Al-Cu-Mg в упрочненном состоянии имеют двухфазное строение – твёрдый раствор (фаза α) и интерметаллид Al2CuMg (фаза S), образующие при закалке легкоплавкую эвтектику, с температурой плавления 518 °С. Во время прохождения сварочного цикла происходит оплавление по границам зерен, основная часть металла остается в твердом состоянии. При охлаждении металла околошовной зоны (ОШЗ) могут образовываться горячие трещины в сварных соединениях под воздействием сварочных напряжений и деформаций в температурном интервале хрупкости, где мала прочность и пластичность. Сначала зарождаются микротрещины по жидким прослойкам по границам зерен из-за концентрации деформации. Затем, при последующем охлаждении металла ОШЗ и возникающих в результате этого растягивающих напряжений происходит развитие трещин, приводящее к хрупкому разрушению – горячим трещинам [1,2].

Определение склонности сплава к образованию трещин производилось на образцах, имитирующих изделия с повышенной жесткостью конструкции. К таким образцам относятся сварка и наплавка по основному материалу, сварка крестовой пробы и сварка круговой пробы.

При сварке образцов по основному материалу при плавном гашении дуги трещины не образуются как при использовании присадочной проволоки, так и без нее. Образование трещин возможно только при резком обрыве дуги.

Были сварены два вида крестовых проб: нежесткая проба; жесткая проба. При сварке нежесткой пробы возникающие при сварке напряжения не приводят к образованию трещин. Небольшая жесткость конструкции приводит к тому, что возникающие при сварке остаточные напряжения недостаточны для образования трещин. В случае с жесткой пробой трещины образуются по основному материалу нижнего листа. За счет большой жесткости конструкции сварочные напряжения не релаксируют за счет деформаций. В результате в углах пробы сварочные напряжения превышают предел прочности, что приводит к образованию трещин

Наиболее жесткой пробой для определения склонности сплава к образованию трещин является сварка круговой пробы в жесткой теплоотводящей оснастке: диаметр круговой пробы изменяли от 50 до 100 мм при различных скоростях сварки. Чем меньше свариваемый диаметр, тем выше жесткость круговой пробы.

Проведенные фрактографические исследования показали, что стенки трещин в металле кругового шва содержат изолированные участки, имеющие рельеф из отдельных шарообразных выступов, т.е. ветвей 2 и 3 порядков древовидных кристаллитов. Разрушение такого вида происходит путем разделения дендритов по жидким прослойкам между ними, что является классическим признаком горячих трещин. Первоначально возникают зародыши горячих трещин по жидким прослойкам, а при дальнейшем охлаждении, т. е. после их

кристаллизации, горячие трещины служат надрезами и приводят к магистральному смешанному хрупко – вязкому разрушению.

Склонность материала к образованию трещин сравнивалась с образцами из материалов 1201 и Д19.

Выводы:

- Установлено, что сплав 1151 склонен к образованию горячих трещин по околошовной зоне.
- Склонность к трещинообразованию сплава 1151ниже, чем сплава Д19 и приблизительно сравнима со сплавом 1201.

## Влияние водорода на сопротивление литого сплава горячей пластической деформации при осадке

Иванов А.Е., Кавченко Е.В., Орлов А.А.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Скворцова С.В.
МАИ, Москва
alexey_24@list.ru

Жаропрочные сплавы на основе Ti3Al являются перспективными материалами для различных изделий авиационной и космической техники благодаря высоким показателям удельной прочности и жаропрочности. Структура сплавов при нормальной и рабочей температурах представлена α2 и β-фазами.

Управлять структурой титановых сплавов в широких пределах и повышать как технологические, так и механические свойства позволяет водородная технология, основанная на обратимом легировании водородом, в частности термоводородная обработка.

Легирование титановых сплавов водородом приводит к увеличению в структуре количества β-фазы, что позволяет добиться снижения сопротивления деформации [1,2,3].

Для определения концентрации водорода и температуры, обеспечивающих высокую технологическую пластичность, были проведены испытания на осадку в изотермических условиях в интервале температур 850 - 1050□С со скоростью деформации 2,7*10-3 с-1. Испытания проводили на образцах диаметром 10 мм и высотой 13 мм. Часть образцов оставлялась с исходным содержанием водорода (0,006%), а часть подвергалась наводороживанию до 0,2, 0,4 и 0,6%.

Образцы из опытного сплава с исходным содержанием водорода осаживались при температурах выше 950°С без образования трещин. При более низких температурах, в процессе испытаний, на боковой поверхности образовывались трещины при степенях деформации εпр=58 (900°С) и 46% (850°С). Максимальное усилие при осадке составило 412 МПа при температуре испытаний 850□С. Введение в сплав водорода снижает деформирующее усилие при 850□С и при 0,6% водорода оно составляет 220МПа. При этом образец деформировался на максимальную степень деформации без образования трещин.

Установлено, что с повышением температуры испытаний и/или содержания водорода в сплаве максимальное усилие осадки уменьшается. При этом максимальное усилие при осадке в сплаве с исходным содержанием водорода при температуре 1000°С оказывается практически равным максимальному усилию при осадке в образце с 0,4% водорода при температуре 900°С. При температурах испытаний 850 и 900□С наблюдается монотонное снижение удельных усилий осадки. При температурах испытаний 950 и 1000□С резкое снижение деформирующих усилий с 250 и 180МПа до 120 и 55МПа, соответственно, наблюдалось при введении в сплав 0,2% водорода. Дальнейшее повышение концентраций водорода не приводило к значительным изменениям усилий осадки, и характер понижения кривых становился прямолинейным. При более высокой температуре осадки 1050□С

деформирующее усилие в исходном и наводороженном состоянии практически не различаются, так как данный интервал температур находится вблизи однофазной β-области.

Таким образом, проведенные исследования показали, что введение в сплав водорода приводит к снижению сопротивления деформации. Чем больше водорода содержится в сплаве, тем ниже максимальное усилие при осадке. Однако, степень этого влияния уменьшается с повышением температуры деформации.

Литература

1. Мамонов А.М. Научные основы и технология термоводородной обработки полуфабрикатов и изделий из конструкционных и жаропрочных титановых сплавов: дис. д-ра техн. наук. ФГБОУ ВПО «МАТИ – Российский государственный технологический университет имени К.Э. Циолковского», Москва, 2011 г.

2. Водородная технология титановых сплавов / А.А. Ильин, Б.А. Колачев, В.К. Носов, А.М. Мамонов; Под общ. редакцией чл.-корр. РАН А.А. Ильина. – М: «МИСиС», 2002. – 392 с.

3. Ильин А.А. Механизм и кинетика фазовых и структурных превращений в титановых сплавах. – М.: Наука, 1994. – 304 с.

## Использование метода конечных элементов при анализе процессов сварки

Иутин Р.В.
Научный руководитель — доцент, д.э.н. Курынцев С.В.
КНИТУ-КАИ, Казань
iutin.roma@mail.ru

В настоящее время в научных исследованиях широкое применение нашли программные комплексы компьютерного инженерного анализа, основанные на методе конечных элементов(МКЭ). Метод конечных элементов представляет собой метод приближенного решения физических задач. Решение происходит в два этапа: на первом происходит разбитие исследуемого объекта на конечное множество элементов, на втором — приближение изучаемой функции в каждой части.

Для контроля процесса сварки разработаны различные способы. К примеру, в работе [1] исследованы закономерности изменение сварочной ванны и парогазового канала во время лазерной сварки с глубоким проплавлением, в работе [2] вычислены параметры, оказывающие наибольшее влияние на форму парогазового канала, в [3] изучена неоднородность межфазной реакции с помощью метода конечных элементов. Метод конечных элементов также был использован в работе [4] при анализе сварки алюминия и титана. В этой работе всю поверхность металла разбили на отдельные элементы с более мелкой сеткой у центральной линии сварки. Далее для каждой секции с помощью дифференциального уравнения была вычислена теплоотдача, теплопроводность и изменение тепловой энергии. После вычисление оказалось, что температура, найденная таким образом в каждом элементе, была близка к температуре, полученной на практике.

Так как вычисление вручную МКЭ занимает большое время в работе [4] применялся программный комплекс Ansys. Для этой же цели могут быть использованы MSC.NASTRAN, MSC.MARC, COSMOS, ABAQUS и др.

Таким образом, применение МКЭ при разных методах обработки лазерным лучом металлических материалов позволяет определить температуру на каждом элементе. Оно позволяет проследить тепловое поведение металлических соедений, выполненых традиционнной лазерной сваркой. Метод является простым и эффективным с точки зрения точности и времени для вычислений.

[1] Zhang L J, Zhang J X, Gumenyuk A, Rethmeier M, Na S J. Numerical simulation of full penetration laser welding of thick steel plate with high power high brightness laser. Journal of materials processing technology 2014; 214: 1710-1720.

[2] Kazemi L, Goldak J A. Numerical simulation of laser full penetration welding. Computational Materials Science 2009; 44: 841-849.

[3] Chen S, Li L, Chen Y, Huanga J. Joining mechanism of Ti/Al dissimilar alloys during laser welding-brazing process. Journal of Alloys and Compounds 2011; A509; 891–898.

[4] Giuseppe Casalino, Michelangelo Mortello, Patrice Peyre. FEM analysis of fiber laser welding of Titanium and Aluminum; Procedia CIRP 41 Elsevier; 2015 ;992 - 997

## Влияние дополнительного легирования водородом на сопротивление деформации сплава на основе орторомбического интерметаллида титана

Касымова Е.А., Жидович А.О., Лим Е.В.
Научный руководитель — к.т.н. Гвоздева О.Н.
МАИ, Москва
kasper1994@inbox.ru

Существующие на сегодняшний день методы производства изделий из сплавов на основе алюминидов титана являются достаточно энергоемкими, так как требуют применения высокомощного оборудования. Эффективным способом снижения трудоемкости изготовления полуфабрикатов за счет снижения усилий и/или температуры деформации является использование технологий, основанных на эффекте обратимого легирования водородом. Известно, что дополнительное легирование титановых сплавов водородом облегчает процесс их деформационной обработки, позволяя либо уменьшить усилия деформирования и при той же температуре, либо снизить на 100-200°С температуру деформации. Сплавы на основе интерметаллида титана Ti2AlNb (орто-сплавы) по сравнению с другими алюминидами титана Ti3Al и TiAl обладают лучшей технологической пластичностью. Однако вопрос об использовании водородных технологий для обработки орто-сплавов еще мало изучен. Проведение исследований в данном направлении является актуальным в свете перспективности применения орто-сплавов в качестве жаропрочных материалов в современной авиационной технике.

Поэтому целью данной работы является исследование влияния содержания водорода на деформируемость орто-сплава.

Исследования проводили на образцах, вырезанных из горячекатаного прутка орто-сплава (Ti-12Al-41Nb-0,9Mo-0,8V-1,3Zr-0,13Si), с различным содержанием водорода – от исходного (0,006%) до 0,4%. Сопротивление деформации определяли при испытаниях на сжатие в изотермических условиях при температуре 950°С и скорости деформации 5□10-3 с-1, по результатам которых строилась зависимость удельного усилия осадки (q) от относительной степени деформации ($\varepsilon=\Delta H/H0$).

При температуре испытания сплав с исходным содержанием водорода является двухфазным (β+О), а фазовый состав сплава, легированного водородом, представлен тремя фазами (β, О и α2), причем в сплаве с 0,2%Н α2-фазы очень небольшое количество, с увеличением содержания водорода количество β-фазы уменьшается, а О- и α2-фаз – увеличивается [1].

Начальное усилие деформирования для образцов с исходным содержанием водорода составило 340 МПа, что более чем на 100 МПа больше, чем для наводороженных образцов: 0,2% – 215 МПа, 0,3% – 240 МПа, 0,4% – 230 МПа.

Зависимость удельных усилий осадки от степени деформации сплава с исходным содержанием водорода и с 0,3-0,4%Н имеет одинаковый характер, когда на начальной стадии пластической деформации наблюдается деформационное упрочнение, а дальнейшее

увеличение степени деформации до 50% сопровождается интенсивным деформационным разупрочнением с достижением минимальных значений – 191 МПа при исходном содержании водорода и 165-170 МПа при 0,3-0,4%Н.

Для сплава, легированного 0,2%Н, зависимость q(ε) имеет другой характер. При степенях деформации ε >5% наблюдается переход от начального участка кривой течения, характеризующего деформационное упрочнение, к более пологому, соответствующему стадии установившегося течения. Среднее значение удельных усилий на данном участке составляет 222 МПа. Основным механизмом релаксации напряжений на этом участке кривой течения служит процесс динамического возврата [2].

После проведенных испытаний только на поверхности образцов с 0,2% Н не было обнаружено каких-либо дефектов, а деформация образцов с 0,3 и 0,4%Н сопровождается образованием глубоких раскрывшихся трещин на боковой поверхности в меридиональном направлении. Хрупкое разрушение образцов обусловлено меньшей объемной долей пластичной β-фазы при 0,3 и 0,4%Н.

Таким образом, проведенные исследования показали, что легирование орто-сплава 0,2% водорода положительно сказывается на сопротивлении деформации, снижая начальное усилие деформирования на 35%.

Список литературы:

1. Орлов А.А., Пожога О.З., Касымова Е.А. Влияние дополнительного легирования водородом на формирование структуры и фазового состава сплава на основе Ti2AlNb // Уральская школа молодых металловедов: сборник материалов XVIII Международной научно-технической Уральской школы-семинара металловедов – молодых ученых (Екатеринбург, 21–23 ноября 2017 г.). – Екатеринбург: УрФУ. 2017, С. 171-175.

2. Полухин П.И., Горелик С.С., Воронцов В.К. Физические основы пластической деформации. – М.: «Металлургиздат», 1982. – 584 с.

## Исследование структуры сварных соединений высоколегированных сталей

Кулагин А.А., Чубуков А.И., Антонов Д.О.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Муратаев Ф.И.
КНИТУ-КАИ, Казань
Kulagin334@yandex.ru

Металлографические исследования и испытания на стойкость металла сварных соединений к межкристаллитной коррозии по методике АМУ проводятся на образцах сварных соединений, представленных на рис.1. Испытываются сварные кольца и пластины, выполненные аргонодуговой сваркой сталей 12Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т и EN 1.4571 с применением проволоки Св-06Х19Н9Т и Св-06Х20Н11М3ТБ в течение 8 часов в кипящем растворе (по требованиям п.п. 4.3.1 - 4.3.6), подготовленном в соответствие с требованиями п. 4.2.1 (ГОСТ 6032). Специфика обнаружения развития МКК в образцах предполагает последующее сплющивание колец в соответствие с требованиями п. 4.4.2 или испытания пластин СС на статический изгиб до угла 90 по требованиям п. 4.4.1 и п. 4.5.1.

Для контроля качества угловых и тавровых СС, стойкости к МКК внутренних поверхностей колец со стороны корня шва в соответствие с требованиями п. 4.5.2 ГОСТ 6032 проведены металлографические исследования. Рис.2,а иллюстрирует микроструктуру угловых сварных соединений, не подвергнутых термической обработке на участках сплавления у корня и усиления (выпуклости). Структура состоит из аустенита - у, ферритной фазы - а (5), карбидов - Сг23С6 и соединений оксисиликатов. На рис.2,6 приведена микроструктура стыковых сварных соединений на участках сплавления у выпуклости шва, подвергнутых аустенитизации при 1080°С. В сварном шве (рис.2,а) микроструктура представлена у и Сг2зСб в ЗТВ у + Сг2зСб + 5 + оксисиликаты недеформирующимися 4,а

балла шкалы «О-СН» ГОСТ 1778 + поры величиной до 0,1мм в СС (Рис.2,б). В целом, стыковые, угловые и тавровые сварные соединения после испытаний на стойкость к МКК отвечают требованиям. Однако рис.3 иллюстрирует различную стойкость стыковых сварных соединений (а) и СС, подвергнутых аустенитизации (б) после кипячения в растворе. Растравливание металла по поверхности сплавления менее ЗОмкм допускается требованиями 4.5.2 ГОСТ 6032. Деградация металла, не подвергнутого термической обработке более интенсивна (рис.3 а, б) и не соответствует требованиям ГОСТ 6032, а СС после аустенитизации практически не деградируют (рис.3 в). Считается [1, 2] МКК развивается в металле, где зерна аустенита оторочены карбидами Cr2зCб. В данном случае исключено условие длительного воздействия температуры 470... 840°С, поэтому металл коррозирует с поверхности.

Таким образом, для обеспечения коррозионной стойкости сварные соединения Cr - Ni сталей эффективно применение аустенитизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.П. Гуляев "Металловедение", Москва "Металлургия", 1986 г.
2. Ф.И. Муратаев Типовые и деградационные признаки микроструктуры сварных соединений конструкционных и специальных сталей // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2013. №2. Выпуск. 3. С84-89.
3. Ф.И. Муратаев Адаптация методики преподавания к требованиям ФГОС ВПО для повышения профессиональных компетенций студентов-материаловедов. //Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2014. № 1. С. 194-197.

## Влияние режима спекания на пористость оксинитридной керамики

Ларионов М.Д.
Научный руководитель — к.т.н. Просвирнин Д.В.
МАИ, Москва
pupermen111@yandex.ru

Прочная керамика имеющая оптические свойства, в том числе на основе оксинитрида алюминия Al23O27N5, является востребованным материалом в различных областях техники, таких как автомобилестроение, авиастроение, производство защитных устройств и сооружений и прочего [1-3].

В рамках исследования были произведены несколько образцов керамики. Исходный порошок, состоящий из Al2O3 и AlN. Данные порошковые составляющие, полученные при помощи метода плазмохимического синтеза, смешивали в планетарной микромельнице в соотношение 40:60, на протяжение 30 минут. [4,5].

Далее порошковую смесь подвергали прессованию, в пресс-форме под давлением 50 МПа. Следующим этапом было спекание. Образцы типа I спекали в вакуумной печи при температурах 1700-1800□С. При этом камеру подвергали двум последовательным циклам «продувка азотом» - откачка до остаточного давления 〖10〗^(-2)… 〖10〗^(-3) мм. рт. ст. Образцы типа II спекали по методу горячего изостатического прессования при температурах 1700-1900□С и давлении 500 кг/см2 в течении 12 минут. Смесь порошков помещали в графитовую форму, стенки которой для предотвращения влияния углерода были покрыты обмазкой из нитрида бора на спиртовой основе. Однако обмазка не устранила внедрения углерода в образец, поэтому была проведена дополнительная термообработка при 1900 С0, для удаления углерода. Полученные образцы подвергали шлифовке и полировке.

Проведённый анализ РФА показал наличие фазы Al23O27N5, однако процесс образования этой фазы прошел не полностью, присутствуют также фазы нитрида и оксида алюминия и др. Такие данные характерны для обоих типов образцов.

Методом УЗК было выявлено, что в образцах присутствует пористость и другие дефекты структуры, об этом говорят скорость распространения звука и коэффициент затухания. Однако стоит отметить что в образцах типа II были достигну более высокие показатели.

Поверхность разрушенного образца типа II показала различие в размерах части (1-5мкм) и наличие пор.

Спекание методом горячего прессование даёт большее уплотнение структуры и в следствии лучшие свойства, из полученных образцов. Полученные данные говорят о том, что следует увеличить температуру и время выдержки при спекание, а так же отказаться от графитовых форм. Так же следует применить спекающие добавки, такие как оксид иттрия.

Исследования поддержаны грантом РФФИ 16-08-00815 А.

## Влияние обработки поверхности на текстуру и остаточные напряжения в циркониевом сплаве Э110

Лебедев М.А.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Бецофен С.Я.
МАИ, Москва
mihan917@mail.ru

Ужесточение условий работы современных энергетических установок увеличивает скорость протекания коррозионных процессов в циркониевых изделиях и повышает уровень их наводороживания. Кристаллографическая текстура оказывает существенное влияние на работоспособность циркониевых изделий. Показано, что в процессе формирования оксидных слоев на циркониевых изделиях на границе раздела с металлом (Me/O) образуется плотный оксидный слой, содержащий помимо моноклинного до 8% тетрагонального оксида, количество которого уменьшается при удалении от границы раздела и переходе к рыхлому наружному оксидному слою. В этом случае тетрагональный оксид имеет выраженную текстуру. Помимо текстуры свойства оксидного слоя зависят от уровня сжимающих напряжений, которые убывают при удалении от границы разделы Me/O. Важно отметить, что изменение остаточных напряжений может сопровождаться переориентацией гидридов, что сказывается на ресурсе изделий. В настоящей работе рентгеноструктурными методами исследовали влияние модифицирования поверхности изделий из циркониевого сплава Э110 (Zr-1%Nb) импульсными ионами углерода, облучением электронами и ионами титана в кислородной среде на формирование в них структурно-фазового и напряженного состояния и закономерности взаимодействия модифицированных поверхностей с водородом. Были реализованы три варианта модифицирования поверхности сплава Э110: обработка ионами углерода с энергией импульса 1 Дж/см^2; облучение электронами и облучение ионами титана в кислородной среде. Текстуру и остаточные напряжения определяли рентгеновским методом на дифрактометре ДРОН-4 в фильтрованном CuKα-излучении. Остаточные напряжения определяли методом «sin^2(fi)». Обработка ионами углерода и титана не изменяет базисную текстуру исходного листа сплава Э110. Облучение электронами приводит к значительному ослаблению базисной текстуры исходного листа. Выдержка в водороде приводит к образованию гидрида ZrH1,5 в образцах, обработанных ионами углерода и титана, но в образцах, облученных электронами, не обнаружено даже следов гидрида. Показано, что модификации поверхности сопровождаются переходом от сжимающих напряжений исходного листа (100-120 МПа) к растягивающим напряжениям (100-150 МПа). Показано, что после модификации ионами углерода и титана воздействие водорода приводит к изменению напряженного состояния от растяжения к сжатию (20-70 МПа). В образцах, облученных электронами, сохранялись растягивающие напряжения (70 МПа).

# Влияние технологии выплавки на однородность распределения легирующих элементов в слитке орто-сплава

Лим Е.В., Слезов С.С., Макаров Ф.В.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Ягудин Т.Г.
МАИ, Москва
seav94@gmail.com

В настоящее время широкое применение сплавов на основе орторомбического интерметаллида Ti2AlNb (орто-сплавов) ограничено недостатками, с которыми сталкиваются технологи при получении слитков и полуфабрикатов из данных материалов. Одна из основных проблем при выплавке слитков сплавов на основе орто-фазы – это получение однородного распределения по сечению легирующих элементов, в первую очередь тугоплавкого ниобия. Одним из основных дефектов в слитках для сплавов с его высоким содержанием является образование включений в виде частиц чистого ниобия.

Проведенные исследования [1-4] показали, что для получения однородных по составу слитков орто-сплавов и получения качественной поверхности слитков без непроплавов и рыхлот необходимо использовать трехкратный вакуумно-дуговой переплав с режимами, близкими к плавке серийных титановых сплавов. Получение однородной структуры слитка также важно для эффективного осуществления дальнейших операций формоизменения. Поэтому целью данной работы является исследование влияния технологии выплавки на распределение легирующих элементов по сечению слитка орто-сплава.

Выплавку двух слитков из орто-сплава марки ВТИ-4 проводили по двум схемам: 1) тройной вакуумно-дуговой переплав (схема ВДП-ВДП-ВДП) с использованием вакуумной дуговой печи; и 2) тройной вакуумно-дуговой переплав, когда второй переплав проводился в вакуумно-дуговой гарнисажной печи (схема ВДП-ВДГП-ВДП).

Для изучения распределения легирующих элементов по сечению слитков были отобраны пробы в виде стружки от торцов и среднего пояска слитков второго переплава. Анализ изменения химического состава по сечению слитка показал, что после второго переплава в вакуумно-дуговой печи наблюдается сравнительно большой разброс содержания основных легирующих элементов – от 10,96 до 12,40 масс.% Al (разница составляет 1,44 масс.%) и от 40,54 до 42,78 масс.% Nb (разница – 2,24 масс.%).

Использование гарнисажной печи для второго переплава позволило в 2-3 раза уменьшить разброс содержания легирующих элементов. Разница в содержании ниобия составила менее 1% по массе, а содержание алюминия практически не меняется по сечению от верхнего торца к нижнему.

Анализ химического состава по сечению слитка после третьего вакуумно-дугового переплава показал, что использование для второго переплава вакуумно-дуговой гарнисажной печи позволяет получить более однородное распределение легирующих элементов, чем при многократном проведении вакуумно-дугового переплава. Разница в содержании алюминия не превышает 0,5 масс.%, а ниобия – меньше 0,3 масс.%.

Распределение других легирующих элементов также оказывается более однородным в случае использования для второго переплава вакуумно-дуговой гарнисажной печи.

Технология выплавки не оказывает влияния на микроструктуру слитка, которая представлена крупными исходными β-зернами и хаотично расположенными внутри них пластинами О-фазы. Вследствие неполного протекания диффузионных процессов при медленном охлаждении для предотвращения образования трещин β→О-превращение осуществляется не полностью, поэтому в структуре слитков сохраняется некоторое количество β-фазы.

Таким образом, для обеспечения равномерного распределения легирующих элементов по сечению слитка и получения однородной структуры сплава на основе орто-фазы предпочтительнее проводить выплавку слитка по схеме ВДП-ВДГП-ВДП.

Список литературы:

1. Dang W., Li J., Zhang T., Zhong H., Xue X.. Hu R. The Phase Transformation and Microstructure Evolution during Heating of Ti2AlNb-based Alloys // Proceedings of the 12th World Conference on Titanium (Ti-2011), Beijing, China, Science Press Beijing. 2012, Vol. 3, PP. 1475–1477.

2. Ночовная Н.А., Алексеев Е.Б., Ясинский К.К., Кочетков А.С. Специфика плавки и способы получения слитков интерметаллидных титановых сплавов с повышенным содержанием ниобия // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011, С. 53-59.

3. N. Nochovnaya, A. Izotova, E. Alexeev, V. Ivanov: Opportunities of Increase of Mechanical Properties of the Deformed Semifinished Products from Ti-Al-Nb System // Proceedings of the 12th World Conference on Titanium (Ti-2011), Science and Technology. 2011, Vol. 2, PP. 1383-1386.

4. Ночовная Н.А., Скворцова С.В., Анищук Д.С., Алексеев Е.Б., Панин П.В. Умарова О.З. Отработка технологии опытного жаропрочного сплава на основе интерметаллида Ti2AlNb // Титан. 2013, №4, С. 24-29.

## Экспериментальное микролегирование литейного магниевого сплава МЛ5 химическими добавками на основе углерода в целях повышения механических свойств

Майоров И.А.
Научный руководитель — академик, д.т.н. Моисеев В.С.
МАИ, Москва
mayorov_ilya@rambler.ru

В настоящее время на производстве используют различные способы повышения механических свойств при литье магниевого сплава МЛ5. Сплав МЛ5 относится к группе магниевых сплавов системы Mg-Al-Zn.

К ним можно отнести:

· Модифицирование расплава защитными флюсами

· Плавка в защитной газовой среде

· Рафинирование расплава (удаление неметаллических включений и водорода из расплава)

· Фильтрация расплава

· Термообработка

Заделом данной работы является использование на производстве углеродосодержащих фильтрующих материалов (магнезит, известняк, графитовый бой). При воздействии жидкого магния с элементами фильтрующего элемента происходит модифицирование расплава.

В основу флюсов входит карналлит ($MgCl_2*KCl$). Так же в них могут входить следующие элементы: хлорид бария ($BaCl_2$); хлорид кальция ($CaCl_2$); оксид магния ($MgO$); фторид кальция ($CaF_2$). Все эти элементы являются неорганическими (не содержат углерод). Флюсы обладают защитными и рафинирующими свойствами.

Целью работы являлась разработка модифицирующей добавки на основе углерода и соединений щёлочноземельных металлов. Углеродсодержащие вещества (мел, мрамор, магнезит, ацетилен) при нагреве разлагаются с выделением углекислого газа ($CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$), вступающего во взаимодействие с магнием ($CO_2 + 2Mg\ 2MgO + C$), с образованием углерода. Выделяющийся углерод участвует в образовании

карбида алюминия $Al_4C_3$. Мелкодисперсные выделения этого соединения являются центрами кристаллизации при охлаждении сплава.

Добавка MgO увеличивает вязкость шлака, $CaF_2$ является рафинирующей добавкой, $BaCl_2$ облегчает отделение шлака от металла и увеличивает его плотность.

Таким образом разработка модифицирующей добавки на основе углерода способна не только оказывать защитные и рафинирующие воздействия на расплав, но и создавать дополнительные центры кристаллизации, которые способствуют повышению механических свойств магниевого сплава МЛ5.

## Проблемы проведения комплексной оценки экологичности материалов

Науменков А.А.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Мануйлова Н.Б.
МАИ, Москва
naum1994@rambler.ru

Современные материалы, применяемые в авиастроении и космической деятельности, как правило, представляют собой сложные комбинации разнородных веществ, по-разному влияющих на человека и окружающую среду (ОС). Традиционно применяемые нормативные подходы к безопасности материалов не обладают достаточной эффективностью, поскольку учитывают и лимитируют только последствия и уровень негативного воздействия на ОС и человека и не могут быть непосредственно применены при решении вопроса анализа экологических свойств материала или изделия. Кроме того, нормативный подход не отражает поведение веществ в изменяющихся физических условиях.

Степень экологичности материала должна определяться уровнем его воздействия на ОС [1]. Поэтому в основе определения экологических свойств должен лежать анализ воздействия материала на ОС на всех этапах жизненного цикла. Единство структуры жизненного цикла продукта, постоянство перечня его стадий и их последовательности позволяют использовать единые подходы и методы анализа в ОЖЦ материала. Практическое инженерное применение ОЖЦ требует перехода от абстрактного качественного анализа к количественному. Последний должен опираться на использование конкретных численных показателей, характеризующих степень негативного воздействия материала на ОС на всех стадиях жизненного цикла. Многообразие форм и видов воздействия материалов, используемых в авиастроении и космической деятельности, на ОС на разных стадиях жизненного цикла изделия и связанных с ними количественных показателей затрудняет проведение анализа экологической безопасности и препятствует практическому сравнительному анализу материалов между собой по экологическим показателям и выбору оптимального материала. Необходим относительно простой и доступный метод проведения анализа экологической эффективности материалов, обладающего, тем не менее, достаточной точностью.

В качестве такого метода инженерной оценки предлагается использование индекса экологической безопасности материала (ИЭБМ), представляющего собой экологическую характеристику материала безотносительно его применения в конкретном изделии и без учета технологии переработки [2]. ИЭБМ является константой для каждого материала и зависит от исходного сырья, применяемого для изготовления материала, технологии его изготовления, от особенностей самого материала и представляет собой сумму соответствующих коэффициентов:

$$Ки=Ксырье+Кизг.мат+Кмат \quad (1)$$

где Ксырье – характеризует экологическую безопасность сырья и его добычи; Кизг.мат – характеризует стадию изготовления исходного материала из сырья; Кмат – характеризует

готовый материал с точки зрения экологической безопасности и воздействия на организм человека.

Расчет ИЭБМ для различных материалов при использовании этой методики представляет собою процесс расчета коэффициентов, которые позволят сравнивать экологические свойства как родственных, так и разнородных материалов, что значительно упростит выбор материалов и позволит более четко оценить вклад любого материала в общую проблему обеспечения экологической безопасности.

1. Оценка экологической безопасности материалов. Статья Философское образование. Булычев С.Н.,Горбачев С.И. Мануйлова Н.Б.,,Дмитренко В.П.,Мессинева Е.М..,Мурманцева Е.Ю. 2017. №1(35) с. 128-134.

2. Методы оценки экологической безопасности конструкционных материалов. В.П.Дмитренко, С.И.Горбачев, С.Н.Булычев, Н.Б.Мануйлова, Е.Ю.Мурманцева / Безопасность в техносфере №6/2016 г. – с.38-47.

## Исследование изменений свойств жаропрочного титанового сплава ВТ20 после химического удаления эксплуатационных загрязнений

Никитин Я.Ю., Савушкин А.Н.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Ночовная Н.А.
МАИ, Москва
nikitinyj@viam.ru

На разных этапах жизненного цикла газотурбинного двигателя (ГТД) приходится сталкиваться с работами по удалению эксплуатационных загрязнений с поверхности деталей проточной части компрессора. Наличие таких загрязнений, как известно, ухудшает характеристики работы двигателя в целом, а также может вызывать определенные трудности при проведении ремонтных операций в заводских условиях.

Достаточно большое количество деталей компрессора ГТД изготавливается из жаропрочных титановых сплавов, для которых также необходимо проведение мероприятий по удалению эксплуатационных загрязнений.

Цель работы - исследовать изменение свойств жаропрочного титанового сплава ВТ20 до и после химического удаления эксплуатационных загрязнений.

Лабораторными исследованиями, на примере сплава ВТ20, показано, что образование эксплуатационных загрязнений не влияет на механические свойства (кратковременную и длительную прочность) сплава.

При химическом удалении загрязнений с использованием некоторых очищающих растворов может наблюдаться снижение массы образцов, а также небольшое травление поверхности, о чем свидетельствует изменение макроструктуры. Рельеф и профиль поверхности при этом изменяется незначительно. Также на некоторых очищенных образцах отмечается локальное повышение микротвердости (не более 5%) по сравнению с исходными образцами (без загрязнений, без обработки). Необходимо отметить, что при проведении очистки загрязнений происходит снижение активности поверхности по сравнению с исходными образцами от 24 до 54 % в зависимости от вида используемого раствора.

Для оценки возможности проведения восстановительного ремонта деталей методом пайки после очистки поверхности от загрязнений были проведены исследования смачивания поверхности образцов титанового сплава ВТ20 припоем ВПр16. После удаления загрязнений ухудшения параметров смачивания сплава (площади растекания и краевого угла смачивания) не происходит вне зависимости от вида применяемого раствора.

Очистка эксплуатационных загрязнений различными растворами не приводит к снижению предела прочности, условного предела текучести и относительного удлинения титанового сплава ВТ20, а также к изменению характера его разрушения при испытаниях на

растяжение, как при комнатной, так и при повышенной температурах. Снижение значений характеристик длительной прочности образцов, очищенных от загрязнений, при проведении испытаний продолжительностью 100 часов не наблюдается.

## Трибологические характеристики керамического композиционного покрытия, полу-ченного методом микродугового оксидирования, с золь-гель обработкой

Николаев И.А., Джабаров А.В.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Ляховецкий М.А.
МАИ, Москва
racer4500@yandex.ru

Применение покрытий при разработке двигателей и энергетических установок свя-зано с необходимостью повысить эксплуатационные свойства, ресурс и надежность эле-ментов конструкции, работающих в экстремальных условиях. Применение различных видов керамических покрытий позволяет увеличить износостойкость, коррозионную стойкость, жаростойкость и др. свойства рабочих поверхностей. Одним из перспектив-ных методов формирования керамических композиционных покрытий является метод микродугового оксидирования (МДО), который применяется для алюминиевых, титано-вых, магниевых, циркониевых и др. сплавов, обладающих «вентильным» эффектом. МДО покрытия обладают высокой износостойкостью, коррозионной стойкостью и адге-зией, но наличие развитой пористости, в связи с особенностями формирования таких по-крытий, ограничивает эти характеристики. Для улучшения трибологических свойств МДО покрытий в работе был использован метод золь-геля, позволяющий заполнить «тех-нологические» поры и улучшить характеристики покрытия.

В качестве образцов для испытаний использовались образцы из алюминиевого сплава АК4-1 диаметром 30 мм и толщиной 5 мм с МДО покрытием, полученным на установке для микродугового оксидирования МАИ-2 со следующими режимными пара-метрами: время t=150 минут; плотность тока j=15 А/дм2; электролит: KOH-1г/л, Na2SiO3-6г/л; температура электролита T=20 оС. После формирования МДО покрытия, образцы пропитывались золь-гелем в состав которого входили следующие вещества: тетраэтокси-силан (ТЭОС); C2H5OH; H2O и HNO3. Для пропитки золь-гелем образцы с покрытием окунались в раствор золя с ультразвуковой интенсификацией перемешивания в течение 5 минут, а затем термообрабатывался в течение 15 минут при температуре 100оС.

Для сравнения трибологических свойств использовалось 3 образца: 1) без золь-гель обработки, 2) с золь-гель обработкой с 10 циклами термообработки, 3) с золь-гель обра-боткой с 15 циклами термообработки. После полимеризации слоев образцы шлифовались для проведения трибологических испытаний. Испытания проводились на машине трения модели 1401, разработанной в МАИ. Реализуемого движение при трении – возвратно-поступательное скольжение с перемещением D = 300 мкм, нормальной нагрузкой в кон-такте Fn = 10 Н, частотой перемещения f = 20 Гц, количеством циклов n = 105.

Испытания показали, что износостойкость образца с дополнительной золь-гель об-работкой стала выше примерно в 5 раз в сравнении с образцом без золь-гель обработки.

# Исследование стойкости к контактной коррозии медицинских материалов

Николаева М.В., Журбина Е.В., Макаров Ф.В.
Научный руководитель — к.т.н. Чернышова Ю.В.
МАИ, Москва
marinzhurbina@gmail.com

В настоящее время в медицине в качестве материалов для имплантатов широко применяются сплавы на основе титана, никелида титана, кобальтовые сплавы и аустенитные нержавеющие стали. Перспективными также являются сплавы на основе циркония. Сочетание разных материалов в конструкциях имплантатов может приводить к возникновению контактной коррозии из-за разницы в электрохимических свойствах.

Оценить вероятность возникновения коррозии и опасность её развития при контакте разных металлических материалов в биологической среде можно несколькими методами. Одним из них является исследование кинетики изменения контактного тока между образцами исследуемых материалов в электрохимической ячейке с физиологическим раствором. Если ток в течение определенного отрезка времени резко падает, то такой контакт не опасен. В том случае, когда ток непрерывно нарастает во времени, контакт материалов считается недопустимым. Если контактный ток стабилизируется во времени, опасность контактной коррозии можно оценивать по его величине.

В качестве другого метода может быть использовано сравнение скорости свободной коррозии материала (в отсутствие контакта с другим материалом) со скоростью контактной коррозии при соединении разнородных материалов. При этом скорость коррозии может быть выражена через массовый показатель Км.

Исследования проводили на образцах из титановых сплавов ВТ1-0, ВТ20, ВТ6 и ВТ23, сплава на основе никелида титана ТН1, циркониевого сплава Э125, а также из нержавеющей стали 12Х18Н10Т и литого кобальтового сплава. В качестве коррозионной среды применяли раствор Рингера (0,9% водный раствор NaCl).

Проведенные исследования позволили установить, что при контакте всех исследованных материалов в растворе Рингера в разных комбинациях нарастания плотности контактного тока во времени не происходит.

Самые низкие значения плотности контактного тока получены для пар сплавов ВТ20 – ВТ6, ВТ1-0–ТН1, ВТ6–12Х18Н10Т, а самое высокое значение – для пары сплав Co-Cr-Mo – сталь 12Х18Н10Т. Методом сравнения скоростей контактной и свободной коррозии установлено, что сочетание нержавеющей стали со сплавом Co-Cr-Mo увеличивает скорость коррозии стали в 22 раза, поэтому такой контакт в конструкциях имплантата может представлять опасность. Нежелательность сочетания комохрома в паре со сталью и титановыми сплавами подтверждается также клинической практикой применения имплантатов. Кроме того в зоне риска находятся металлические пары титан–никелид титана и титан–цирконий. Полученные результаты показывают необходимость тщательных коррозионных исследований при проектировании имплантируемых медицинских изделий, конструкции которых содержат компоненты из разных металлических материалов.

# Влияние температуры нагрева под закалку на изменение фазового состава и структуры сплава ВТИ-4, дополнительно легированного водородом

Орлов А.А., Иванов А.Е., Касымова Е.А.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Скворцова С.В.
МАИ, Москва
lxg2094@mail.ru

Помимо различных режимов термической обработки, эффективным способом управления структурно-фазовым состоянием для достижения необходимого уровня технологических свойств титановых сплавов является термоводородная обработка. Исследования о легировании водородом сплавов на основе интерметаллидов Ti3Al и TiAl, отраженные в немногочисленных публикациях, также свидетельствуют о благоприятном влиянии водорода на структуру и деформационную обработку данных материалов. Однако в силу присущим им низким пластическим свойствам значительного улучшения технологичности, особенно в отношении TiAl, достичь не удается.

Вопрос об исследованиях в области водородных технологий сплавов на основе интерметаллида Ti2AlNb (орто-сплавов) остается малоизученным, и о каком-либо практическом применении водородных технологий относительно получения различного рода полуфабрикатов и разработке режимов термоводородной обработки орто-сплавов практически нет сведений. Однако решение данного вопроса является актуальным в свете перспективности орто-сплавов для применения в качестве жаропрочных материалов в современной авиационной технике.

Данная работа является продолжением исследований [1,2], в которых было показано, что после наводораживающего отжига структура сплава с 0,1 и 0,2%H (здесь и далее % по массе) является двухфазной (β+O), а структура сплава с 0,3 и 0,4%H представлена только O-фазой. Также было установлено влияние водорода на температуру полиморфного превращения, и построен участок диаграммы ВТИ-4 – H в температурном интервале 950° – 1200°C.

В данной работе проводилось исследование фазового состава орто- сплава ВТИ-4 при содержании водорода от исходного (0,006%) до 0,4%. В температурном интервале 800° – 950°C методом пробных закалок. Исследования структуры и фазового состава образцов проводили с помощью металлографического и рентгеноструктурного фазового анализа.

Сплав с исходным содержанием водорода и легированный 0,1%H в исследованном температурном интервале является двухфазным (β+O). В сплаве с 0,2%H структура представлена тремя фазами (β+O+α2) после закалки с 900° и 950°C. Понижение температуры до 850°C приводит к исчезновению отражений от α2-фазы, и в температурном интервале 800°-850°C сплав является двухфазным – (β+O). Сплав, содержащий 0,3%H, представлен тремя фазами (β+O+α2) во всем интервале температур от 950° до 800°C. Понижение температуры нагрева в интервале 950° – 850°C приводит к изменению количественного соотношения фаз в сплаве с 0,4%H в сторону уменьшения количества β-фазы и увеличения доли интерметаллидных фаз, а при температуре 800°C структура сплава является двухфазной (O+α2), отражений от β-фазы обнаружено не было.

По результатам проведенных исследований был построен участок диаграммы ВТИ-4 – H с концентрацией водорода от исходной до 0,4% и в температурном интервале от 800° до 1200°C с нанесенными на него линиями фазовых переходов, отражающий фазовый состав наводороженного сплава в зависимости от температур нагрева.

Проведенный анализ участка диаграммы ВТИ-4 – H показывает, что в исследованных температурно-концентрационных условиях в системе обнаруживаются следующие фазовые области: однофазная B2-область; двухфазные (β+O)- и (O+α2)-области; трехфазная (β+O+α2)-область. Температура перехода в однофазную область повышается с увеличением содержания водорода от 0,1 до 0,4% с 990° до 1165°C соответственно. Граница, разделяющая

двухфазную (β+O)- и трехфазную (β+O+α2)-области, с понижением температуры нагрева под закалку смещается в сторону бóльших концентраций водорода – от Сн=0,1% при 950°С до Сн=0,2% при 800°С. Низкотемпературная граница трехфазной (β+O+α2)-области смещается в сторону меньших концентраций водорода при понижении температуры нагрева под закалку – от Сн=0,4% при 850°С до Сн=0,3% при 800°С.

Построенная диаграмма имеет важное практическое значение, так как позволяет осуществлять рациональный выбор температурно-концентрационных параметров для проведения деформационной и термоводородной обработок и получения в интерметаллидном титановом сплаве ВТИ-4 заданного структурно-фазового состояния.

Литература

1. Умарова О.З., Орлов А.А., Демаков А.А. Влияние дополнительного легирования водородом на температуру полиморфного превращения сплава на основе интерметаллида титана Ti2AlNb // Гагаринские чтения – 2017: XLIII Международная молодёжная научная конференция: сб. тезисов докладов. – М.: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). 2017, С. 239-240.

2. Орлов А.А., Пожога О.З., Касымова Е.А. Влияние дополнительного легирования водородом на формировании структуры и фазового состава сплава на основе Ti2AlNb // Уральская школа молодых металловедов: материалы XVIII Международной научно-технической Уральской школы-семинара металловедов – молодых ученых (Екатеринбург, 21–23 ноября 2017 г.). – Екатеринбург: УрФУ. 2017, С. 171-175.

## Сверхбыстрая закалка магниевых сплавов методом экстракции висящей капли расплава

Патрушев А.Ю.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Серов М.М.
МАИ, Москва
lokotrains@yandex.ru

В процессе производства изделий аэрокосмической отрасли на основе магниевых сплавов, получаемых традиционным литейным способом, для повышения механических свойств изделия проводят закалку. Закалка способствует значительному повышению прочностных, а также пластических свойств сплавов.

На закалку магниевых сплавов оказывают существенное влияние скорость закалки, коэффициенты диффузии большинства компонентов в твердых растворах магния. Вследствие низкой скорости охлаждения в процессе закалки сплавов на основе магния наблюдается неравновесная кристаллизация и сильно развитая дендритная неоднородность. В свою очередь, дендритная ликвация вызывает снижение механических свойств и технологической пластичности слитков. При больших скоростях охлаждения литых изделий с закалочных температур с последующим старением наблюдается выделение частиц стабильной фазы, которая равномерно распределяется по всему объему изделия, что способствует повышению прочности и пластичности.

Сверхбыстрая закалка из расплава способствует лучшей растворимости легирующих элементов, присутствующих в сплаве, и, помимо этого, получать материалы с более диспергированной структурой и однородным распределением легирующих элементов, что значительно улучшает механические свойства материала, но, в свою очередь, приводит к возникновению неустойчивой микрокристаллической структуры, которая меняется в процессе последующей термической обработки материала. Одним из методов получения материалов сверхбыстрой закалкой является экстракция висящей капли расплава, позволяющая получать волокна с последующим спеканием до готового изделия. Основной принцип ЭВКР заключается плавление нижней части торца вертикально расположенного

прутка и приведение сформировавшейся капли расплава в контакт с остро заточенной рабочей кромкой вращающегося охлаждаемого диска. На кромке диска происходит охлаждение материала со скоростью до миллиона градусов в секунду и затвердевание в виде волокна толщиной 20-150 мкм.

Таким образом, сверхбыстрая закалка магниевых сплавов позволяет получать материалы с повышенными прочностными характеристиками изделий по сравнению с традиционными способами закалки литых изделий.

## Формирование напряженного состояния в поверхностном слое конструкционных сталей при проведении операции шлифования

Першуков М.М.
Научный руководитель — к.т.н. Маркова Е.В.
ТулГУ, Тула
michapercha@yandex.ru

Высокоточную чистовую и отделочную обработку материалов проводят, используя метод шлифования как финишный процесс формообразования поверхности. Острые кромки зерен срезают с поверхности изделия слой металла, и процесс резания каждым зерном осуществляется почти мгновенно. Каждое зерно, удерживаемое связующим материалом на периферии шлифовального круга, работает как зуб фрезы, снимая стружку переменного сечения. Обработанная поверхность представляет собой совокупность микросследов абразивных зерен и имеет малую шероховатость. Абразивные зерна оказывают на заготовку существенное силовое воздействие, вследствие чего происходит поверхностное пластическое деформирование материала и как следствие искажение его кристаллической решетки. Деформирующая сила вызывает сдвиг одного слоя атомов относительно другого. Вследствие упругопластического деформирования материала обработанная поверхность упрочняется.

Шлифование ведется при больших скоростях, поэтому в зоне резания возникает высокая температура (до 1000-1500 оС).

В работе исследовали поверхностный слой сталей 30ХРА и 30ХН2МФА после проведения шлифования, электрохимического полирования и алмазного электрохимического шлифования.

Для определения параметров субструктуры поверхностного слоя образцов использовали метод рентгеноструктурного анализа. Съемку дифрактограмм проводили на дифрактометре ДРОН-2 в CoKα- излучении. При этом определяли величину физического уширения дифракционных линий. Определение зональных остаточных напряжений проводили рентгенометрическим способом.

Измерение микротвердости производили на микротвердомере ПМТ-3 по ГОСТ 9450-75 с нагрузкой 2 Н.

Рентгеноструктурный анализ показал формирование растягивающих напряжений в поверхностном слое образцов после шлифования. Вследствие этого применение для окончательного формообразования ответственных деталей шлифования может проводиться только с учетом возможных негативных свойств поверхностного слоя, который необходимо удалять операцией электрохимического полирования.

В результате исследований получено, что более целесообразно применение операции алмазного электрохимического шлифования, которое не дало растягивающих напряжений в поверхностном слое и характеризуется меньшими субструктурными искажениями.

Проведение дюрометрического анализа стали показало повышение значений микротвердости в поверхностном слое всех образцов исследуемых сталей после проведения операции шлифования. Изменение износостойкости поверхностного слоя после шлифования

имеет тот же тренд, что и изменение твердости, что может быть объяснено с позиций некоторого поверхностного упрочнения, связанного с повышением плотности дефектов и микроискажений

## Технологические аспекты получения и механические свойства дисперсно-упрочненного алюмоматричного композиционного материала со слоистой структурой

Петухова О.С., Аккужин Н.Д.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Иванов Д.А.
МАИ, Москва
p3tukhovao@yandex.ru

Дисперсно-упрочненные алюмоматричные композиционные материалы (КМ) находят широкое применение в технике в качестве нагруженных элементов конструкций [1,2] при нормальной температуре и эксплуатационном нагреве до 500 °С, при термоциклировании (от -130 °С до + 150 °С), в триботехнике, а также в случае воздействия знакопеременных и динамических нагрузок.

Развитие технологических подходов, обеспечивающих повышение физико-механических свойств алюмоматричных материалов, связано с применением композитных принципов формирования их структуры (алюмостеклопластики – СИАЛ-ы, композит алюминий-сталь КАС). В этом случае возможно существенное повышение вязкости разрушения и сопротивления усталостной трещине материалов при их невысокой плотности (2,5 г/см3).

В рамках данной работы предложен экономичный способ получения порошкового алюмоматричного дисперсно-упрочненного КМ со слоистой структурой.

В качестве исходного сырья для получения материала использовали промышленно производимую алюминиевую пудру марки ПАП-2, состоящую из частиц чешуйчатой формы субмикронной толщины (удельная поверхность – 4 м2/г). Исходя из условий получения пудры, ее частицы являются наклепанными и покрыты тонким слоем стеарина.

Для использования пудры ПАП-2 в качестве пресс-порошка был разработан метод ее гранулирования с насыпной плотностью получаемого гранулята – 0,4 – 0,5 г/см3.

Сырые заготовки получали прессованием пресс-порошка в стальной пресс-форме под давлением 700 МПа. Спекание заготовок проводили в вакууме (разряжение 10-5мм. рт. ст.) при температуре 630-650°С.

Установлено, что спекание реализуется с участием жидкой фазы, образование которой происходит за счет формирования эвтектического расплава Al-Al4C3 по поверхности контакта чешуйчатых частиц, что приводит к их плотному сращиванию в результате кристаллизации при охлаждении.

Методом оптической и растровой электронной микроскопии (РЭМ) установлено, что спеченный материал имеет слоистую структуру, которая складывается из чередующихся чешуйчатых субмикронных частиц, объединенных в слоистые пакеты.

Методом рентгенофазового анализа с поверхности шлифа показано, что в объеме чешуйчатых частиц фиксируются дифракционные спектры частиц γ – Al2O3, Ѳ– Al2O3 и Al4C3.

Согласно данным РЭМ размеры этих частиц относятся к наноразмерному диапазону и обеспечивают эффект дисперсионного упрочнения.

Разработанный материал имеет следующие свойства: плотность – 2,6 г/см3, предел прочности при изгибе – σизг =550 -600 МПа, предел прочности при растяжении - σв =300 – 380 МПа. Указанные характеристики практически не изменяются при повышении температуры испытания до 500-550°С.

Литература

1. Панфилов А.А., Прусов Е.С., Кечин В.А. Проблемы и перспективы развития производства и применения алюмоматричных композиционных сплавов // Тр. Нижегор. гос. техн. ун-та им. Р.Е. Алексеева. 2013. No. 2. С. 210—218.

2. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиац. материалы и технологии. 2012. No. S. С. 7—17.

## Влияние вакуума на механические свойства алюминиевых сплавов при повышенных температурах

Писарев А.В., Полянская Л.В., Гавриков А.Г.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Воронин С.В.
СНИУ им. С.П. Королёва, Самара
pisarev.aleks2015@gmail.com

Для создания перспективных космических аппаратов необходимо знать эксплуатационные свойства и размерную стабильность материалов в условиях космической среды. К основным факторам космического пространства принято относить вакуум, повышенные и пониженные температуры, ионизационные излучения, воздействие атомарного кислорода, метеороидов и т.д. При создании космических аппаратов широко используются сплавы на основе алюминия. Поэтому целью данной работы является исследование влияние вакуума при повышенных температурах на механические свойства алюминиевого сплава АМг3, который используется при создании узлов космической техники.

Исследования проводились на установке «АЛА-ТОО» типа ИМАШ-20-75, которая предназначена для испытания образцов на растяжение в вакууме, при повышенных и пониженных температурах. Испытанию подвергались образцы из сплава АМг3 с габаритами рабочей зоны 18,5х3,0х2,0 мм. Перед проведением испытания на образцы наносилась разметка начальной расчетной длины согласно ГОСТу 11701-84. Данные образцы подвергались одноосному растяжению со скорость деформирования 6,35 мм/час, при температурах 20С и 200С при атмосферном давлении 760 мм.рт.ст. и при вакууме со степенью разряжения от 1,3·10-2 до 7,9·10-3 мм.рт.ст. Образцы устанавливались в захваты растягивающего механизма в вакуумной камере. В течении 50-60 минут, за счет механического вакуумного насоса создавалась степень разряжения равная 1,3·10-2 мм.рт.ст. Затем, в случае испытаний при температуре 200С, включался режим нагрева. Время выдержки при температурах испытаний составляло 30 мин, затем осуществлялось деформирование образцов. В течении периода выдержки и деформирования степень разряжения атмосферы увеличивалась до 7,9·10-3 мм.рт.ст. После проведения испытаний замерялась конечная расчетная длина образца, по которой определялось относительное удлинение. В ходе испытаний были получены диаграммы растяжения, обработка которых позволяет определить предел текучести и предел прочности материала.

Анализ полученных результатов показал, что при атмосферном давлении с повышением температуры от 20С до 200С наблюдается уменьшение предела текучести с 110 МПа до 70 МПа, предела прочности с 195 МПа до 86 МПа и увеличение относительного удлинения с 17,5 % до 38,5 %, что соответствует общепринятым закономерностям деформационного поведения и изменения механических свойств с увеличением температуры.

При проведении испытаний в вакууме с повышением температуры от 20С до 200С наблюдается уменьшение предела текучести со 125 МПа до 97 МПа, предела прочности с 230 МПа до 115 МПа и увеличение относительного удлинения с 18,0 % до 32,0 %.

При 20С с понижением давления наблюдается увеличение предела текучести с 110 МПа до 125 МПа, предела прочности – с 195 МПа до 230 МПа, относительное удлинение – с 17,5 % до 18,0 %.

При 200С с понижением давления наблюдается увеличение предела текучести с 70 МПа до 97 МПа, предела прочности – с 86 МПа до 115 МПа, снижение относительного удлинения – с 38,5 % до 32,0 %.

В процессе исследования показано влияние вакуума на механические свойства алюминиевого сплава АМг3. Установлено, что в вакууме при 20С происходит увеличение предела текучести на 13,6 %, предела прочности на 18 %, относительного удлинения на 2,7 % по сравнению с испытанием при атмосферном давлении. В вакууме при 200С предел текучести увеличился на 38,6 %, предел прочности – на 33,7 %, относительное удлинение уменьшилось на 16,0 %.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение №14.578.21.0228, уникальный идентификатор работ (проекта) RFMEFI57817X0228).

## Анализ процесса зарождения микротрещин в высокогетерогенных диффузионных слоях покрытий

Русин И.С.
Научный руководитель — профессор, к.ф-м.н. Нечаев Л.М.
ТулГУ, Тула
ru5ini@yandex.ru

Задачи по критериальной оценке усталостной повреждаемости могут решаться в пределах рассмотрения механизмов и кинетики малых трещин. Это предусматривает исследование значений пороговых коэффициентов интенсивности напряжений с целью снижения трешиностойкости, а также установления количественных соответствий между скоростью их роста и характеристиками структурной гетерогенностью подслоя. Традиционные подходы механики разрушения в данном случае использовать корректно невозможно, так как они нацелены на рассмотрение основной магистральной стадии распространения трещин.

Топография очагов зарождения усталостных микротрещин определяется уровнем структурной гетерогенности активных диффузионных зон. У малогетерогенных диффузионных слоев в первую очередь повреждаются объемы на глубине подслоя, где размеры частицы второй фазы составляют 0,5-0,7 мкм. По мере увеличения степени структурной гетерогености области внутреннего зарождения трещин смещаются ближе к поверхности диффузионного подслоя. Очаг повреждаемости для среднегетерогенного слоя находится, как правило, на внутренней границе активной диффузионной зоны, где формируются дисперсные частицы второй фазы размерами 0,05-0,07 мкм. В наиболее гетерогенных структурах поврежденные зоны смещаются ближе к стыку «покрытие-подслой». Отмечено также заметное влияние пористости в структуре диффузионного слоя на топографию зарождения микротрещин и активизацию процесса внутренней повреждаемости.

В высокогетерогенных диффузионных слоях реализуется зарождение микротрещин от частиц второй фазы. Гетерогенная схема повреждаемости при усталости может быть связана и с протяженными несплошностями, и частицами второй фазы. Дефекты первого типа, в силу их геометрической природы являются определяющими.

Исследования кинетики процессов трещинообразования в гетерогенных структурах подслоев показали, что скорость поверхностного разрушения для действующего уровня

внешних напряжений в значительной степени зависит от типа, размеров и плотности частиц второй фазы.

Кинетически более устойчивой нераспространяющейся малой трещиной является та, которая развивается в наименее гетерогенной зоне. Живучесть короткой трещины, отражаемая числом циклов до ее остановки, составляет порядка 103-104 циклов, логически коррелирует с уровнем внешних напряжений и является минимальной для наиболее гетерогенного диффузионного слоя.

В качестве критериев оценки для малых трещин необходимо и достаточно иметь качественный параметр, определяющий порог трещинообразования с учетом двухфакторного влияния частиц вторых фаз Kvtp и количественный – позволяющий оценивать скорость малых трещин при некоторых докритических значениях параметра Kvtp. Сопоставление расчетных и экспериментальных скоростей трещин показывает, что введение количественной оценки влияния структурной гетерогенности позволяет значительно снизить величину ошибки в оценке скорости трещин по сравнению с известными в литературе кинетическими зависимостями.

## Диффузионная сварка: Влияние примесей кислорода и азота на пластическую деформацию монокристаллического кремния, как одну из причин нестабильности сварного соединения с металлами

Салмин П.А., Захаров А.С.
Научный руководитель — профессор, к.т.н. Барабанова О.А.
МАИ, Москва
freemanhuk@gmail.com

Диффузионная сварка – один из способов сварки давлением с низкоинтенсивным термодеформационным воздействием на свариваемые материалы. Способ диффузионной сварки имеет ряд отличительных особенностей, благодаря которым он может быть успешно использован для соединения полупроводниковых материалов с металлами, так, проведение процесса в вакууме надежно предохраняет соединяемые поверхности от окисления, загрязнения и при оптимальном технологическом режиме гарантирует стабильность исходных механических и электрофизических свойств полупроводниковых структур. Однако имеет место нестабильность диффузионного соединения кремния с металлами, одной из причин которой является пластическая деформация кремния, обусловленная наличием примесей кислорода и азота, которое зависит от способа изготовления монокристалла.

Для производства монокристаллического кремния используются две технологии: бестигельная зонная плавка и вытягивание кристалла из расплава в тигле методом Чохральского.

Небольшое количество азота в кремнии порядка 10^15 ат/см3 повышает устойчивость пластин кремния к термически индуцированному короблению в процессе изготовления полупроводниковых приборов. Пластины, вырезанные из слитков, выращенных по Чохральскому, содержат порядка 10^18 ат/см3 кислорода. Междоузельный кислород ужесточает кристаллическую решетку кремния, увеличивая порог скольжения дислокаций. Обычно пластины кремния, вырезанные из слитков, полученных зонной плавкой, содержат менее 10^16 ат/см2 кислорода и мало углерода и могут разрушаться под действием термических напряжений, но легированные небольшим количеством азота, они превосходят материал, выращенный по Чохральскому с большим содержанием кислорода.

Анализ способов изготовления монокристалла кремния показал, что на пластическую деформацию кремниевых пластин влияет содержание в них кислорода и азота:

- Междоузельный кислород ужесточает кристаллическую решетку кремния, увеличивая порог скольжения дислокаций;
- Азот в малых концентрациях ограниченных растворимостью эффективно препятствует перемещению дислокаций;

Выше изложенное позволяет расставить приоритеты при выборе способа изготовления монокристаллического кремния для диффузионной сварки с металлами:

- Зонно-очищенный кремний;
- Кремний, выращенный методом Чохральского;
- Зонно-очищенный кремний, легированный азотом.

## Термоводородная обработка и водородное пластифицирование как перспективные технологии обработки титановых сплавов с высоким содержанием алюминия

Слезов С.С., Бачеева А.В., Сперанский К.А.
Научный руководитель — профессор, Мамонов А.М.
МАИ, Москва
slezov93@mail.ru

В настоящее время предъявляются высокие требования к медицинскому инструменту, применяемому в травматологии и ортопедии по: коррозионной стойкости, твердости, удельной прочности, износостойкости и жесткости конструкции. Одним из наиболее перспективных материалов, применяемых для изготовления медицинских режущих инструментов являются титановые сплавы с повышенным содержанием алюминия. Высокое содержание алюминия увеличивает модуль упругости сплава. Модуль упругости в совокупности с геометрией определяет жесткость изделия, что является важным для крупногабаритного хирургического инструмента.

Однако, для получения заготовок инструмента методом изотермической штамповки необходим достаточный уровень технологической пластичности. Таким образом на технологической стадии изготовления инструментов необходимо управление структурным состоянием сплава и достижение оптимального сочетания технологических и эксплуатационных свойств.

Одной из наиболее перспективных комплексных технологий для титановых сплавов с высоким содержанием алюминия является технология, включающая термоводородную обработку (ТВО) и водородное пластифицирование (ВП), основанные на обратимом легировании водородом.

Исследования были проведены на образцах, вырезанных из горячекатаного прутка диаметром 15 мм опытного сплава Ti-8,7Al-1,5Zr-2,0Mo. Фазовый состав сплава представлен α- и α2 - фазами и малым количеством β - фазы (≤ 8%).

Установлено, что легирование водородом до концентраций 0,3 и 0,6 % масс. не изменяет фазового состава сплава при нормальной температуре, приводя только к увеличению объемной доли β-фазы до 20 и 30%, соответственно, что должно обеспечить увеличение технологической пластичности сплава.

Были проведены испытания на осадку при температурах 800 и 850 °С. Анализ результатов испытаний показал, что водород приводит к снижению предела текучести сплава при обеих температурах деформации. Это связано с увеличением объемной доли более пластичной β-фазы. Легирование водородом в исследованном интервале концентраций позволяет осуществлять горячую пластическую деформацию сплава при температурах не выше 850 °С, что характерно для деформации серийных сплавов конструкционного назначения.

В результате исследований разработаны и опробованы на образцах сплава два режима вакуумного отжига. Первый режим был направлен на получение мелкодисперсной структуры сплава с субмикрокристаллической α(α2) - фазой. Второй - на получение бимодальной структуры с глобулярной первичной α(α2) - фазой и мелкодисперсной субмикрокристаллической вторичной α-фазой в β-матрице. Установлено, что ТВО приводит к увеличению прочности и твердости сплава.

Таким образом показана эффективность водородных технологий при обработке высокомодульных титановых сплавов. Такие сплавы перспективны для изготовления высокоресурсного, износостойкого режущего медицинского инструмента, применяемого в травматологии и ортопедии, в частности при имплантации эндопротезов крупных суставов человека.

## Влияние микродугового оксидирования на коррозионную стойкость титановых сплавов, применяемых в медицине

Солодова Т.В.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Крит Б.Л.
МАИ, Москва
tanja_solodova@mail.ru

Актуальной задачей современного материаловедения в области медицины является решение проблемы восстановления дефектов костной ткани для обеспечения возможности нормального функционирования поврежденного органа. Из всего многообразия металлов и сплавов в медицине для имплантации в живой организм используется очень ограниченный круг сплавов. Из всего многообразия металлов и сплавов в медицине для имплантации в живой организм используется очень ограниченный круг сплавов. В первую очередь это обусловлено тем, что имплантируемый материал должен обладать биологической совместимостью (инертностью) с живыми тканями, коррозионной стойкостью и обеспечивать наибольшую механическую совместимость.

Способность титана и сплавов на его основе к самопассивации в биологических средах делает их высоко-перспективными в качестве имплантатов. За счет образования на поверхности материала пленки из оксида титана Ti2O, она способна обеспечить защиту во многих средах не только от общей коррозии, но и от питтинговой коррозии.

Не всегда свойства готовых сплавов удовлетворяют потребностям производства. В связи с этим совершенствуются способы их улучшения. Ряд технических решений, направленных на повышение долговечности изделий, основан на создании различными методами поверхностных защитных покрытий. Одним из эффективных способов повышения коррозионно- и износостойкости является применение микродугового оксидирования (МДО) поверхности.

Сущность МДО заключается в том, что под действием высокого напряжения, прикладываемого между находящейся в электролите деталью и электродом, на поверхности детали возникают мигрирующие точечные микродуговые разряды, под термическим, плазмохимическим и гидродинамическим воздействием которых поверхностный слой детали перерабатывается в керамическое покрытие, прочно сцепленное с основой.

Сплавы на основе титана в настоящее время являются наиболее перспективными материалами для изготовления имплантатов, т.к. обладают высоким комплексом механических свойств и хорошей биосовместимостью, одним из показателей которой является высокая коррозионная стойкость. Применение титановых сплавов особенно актуально при изготовлении эндопротезов крупных суставов человека, например эндопротезов тазобедренного сустава (ЭТБС).

В работе исследовалось изучение влияния МДО на коррозионную стойкость титана и сплавов на его основе, применяемых в медицине.

Для исследований были выбраны образцы, вырезанные из листового полуфабриката титанового сплавов ВТ6, ВТ1-0, ВТ 20. Перед нанесением МДО-покрытия для каждого из образцов материалов были индивидуально подобраны составы электролитов.

Основными контролируемыми параметрами, определяющими процесс формирования покрытия, являлись длительность анодного и катодного импульсов, их амплитуда, частота следования импульсов, длительность процесса нанесения.

По результатам рентгеноструктурного анализа было выявлено, что основным компонентом, входящим в состав МДО-покрытия образцов титановых сплавов является диоксид титана TiO2 (рутил, брукит). Полученное межплоскостное расстояние d/n = 2,18 и угол пика (101) 2 θ =20°40′ сответствуют модификации TiO2 рутил. А брукиту соответствует d/n = 3,51 и угол пика (100) 2θ=20°40′.

Анализ результатов проведенных исследований показал, что свойства МДО-покрытий, такие как пористость, фазовый состав, и следовательно, коррозионная стойкость, в значительной степени, определяются не только химическим составом подложки, но и параметрами самого процесса МДО (составом электролита, величиной напряжения, плотностью тока и др.). Поэтому для формирования качественного плотного МДО-покрытия на титановых сплавах, обладающего высокими защитными свойствами, необходим индивидуальный подбор всех параметров. Это достаточно длительный и трудоемкий процесс, требующий дальнейшего изучения.

Список использованной литературы:

1. "Закономерности влияния объемной и поверхностной структуры на электрохимическую коррозию имплантатов из сплавов на

основе титана и никелида титана" автор Чернышева Юлия Владимировна, ссылка http://dis.podelise.ru/text/index-15078.html, 2012г.

## Исследование процесса получения детали типа «корпус» из алюминиевого сплава АК4-1 с использованием математического моделирования

Сумин С.А., Комаров Р.С.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Шлёнский А.Г.
МАИ, Москва
gtaseven@mail.ru

В современном экономическом обществе, получившим мощный удар от кризиса, машиностроительным предприятиям приходится выдерживать сильную конкуренцию и представлять наиболее дешевую продукцию при том высокого качества и с минимальными затратами на их производство.

Применение математического моделирования для проектирования технологического процесса штамповки позволяет значительно сократить время, средства и отказаться от проведения экспериментальных исследований при создании того или иного изделия различной сложности.

В работе рассматривается два варианта изготовления изделия «корпус»: в открытом и закрытом штампах. При этом применяется специализированная программа DEFORM.

При моделировании открытой штамповки был выявлен интенсивный перегрев поковки.

Снижение температуры заготовки в этом случае может сказаться на не заполнении ручья и на износе инструмента.

Моделирование закрытой штамповки показало, что:

-Возможность снизить температуру нагрева заготовки на 20 градусов и избежать перегрева.

-Возможность отказаться от облоя и обрезного штампа.

-Возможность использовать оборудование меньшей мощности (на 25%).

-Заготовка испытывает меньше деформаций и напряжений.

-Смыкание закрытого штампа не произойдет, если заготовка окажется размером меньше.

Результаты моделирования дают возможность удешевить производство, предусмотреть возможные недочеты техпроцесса и дефекты изделия, сэкономить на исходном материале, дополнительном оборудовании и персонале, при этом получить конкурентоспособное изделие.

## Учет просачивания магнитного поля сквозь стенку заготовки в процессах магнитно-импульсной формовки

Тиабашвили А.Т.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Черников Д.Г.
СНИУ им. С.П. Королёва, Самара
tiabashvili94@mail.ru

Явления, происходящие в системе «индуктор – обрабатываемая заготовка», носят весьма сложный характер. В связи с этим, создание точной универсальной методики расчета процессов магнитно-импульсной обработки металлов (МИОМ) связано со значительными трудностями. Поэтому аналитические расчеты и численное моделирование процессов МИОМ обычно проводят на упрощенных моделях при допущениях, касающихся параметров разрядной цепи магнитно-импульсной установки (МИУ) и магнитного поля в изоляционном зазоре, в материале индуктора и заготовки, а также физических и механических свойств материалов индуктора и заготовки [1].

Наиболее точные результаты дает компьютерное моделирование процессов, так как оно использует наименьшее количество упрощающих допущений, например, с помощью программного комплекса LS-DYNA, который позволяет учитывать явления электромагнетизма, тепла и механики [2]. Однако использование компьютерного моделирования процессов МИОМ позволяет решать только прямую задачу, то есть определять результаты выполнения операции при заданных начальных параметрах процесса. Кроме того, машинное время расчета одного варианта технологического процесса МИОМ с помощью комплекса LS-DYNA на современном персональном компьютере составляет несколько часов.

Объем расчетов может быть значительно сокращен, если предварительно оценить границы области поиска оптимальных начальных параметров процесса с помощью упрощенных инженерных методик. Такие инженерные методики могут использоваться для разработки промышленной технологии с последующей экспериментальной отработкой процесса.

Одна из инженерных методик, основные элементы которой изложены в работе [3], учитывает потери энергии на создание поля внутри индуктора в случае формовки по схеме раздачи заготовки, наличие витков индуктора, не прикрытых заготовкой и влияние на процесс перемещение заготовки. Она позволяет по заданным параметрам заготовки и готовой детали определить необходимые параметры магнитно-импульсной установки, индуктора и режима обработки. Однако она не учитывает влияния на процесс проникновения импульсного магнитного поля через стенку заготовки при формовке тонкостенных заготовок.

Целью данной работы являлось определение области допустимого использования данной методики при анализе процессов формовки тонкостенных (толщиной от 0,18 до 1,5 мм) заготовок из алюминиевого сплава 8011А.

Для достижения поставленной цели проводился комплекс исследований процесса формовки кольцевого рифта на листовых алюминиевых заготовках различных толщин, который включал проведение экспериментов, расчет необходимой величины энергии разряда МИУ для формовки полученной высоты кольцевого рифта по инженерной методике и моделирование процесса с помощью комплекса LS-DYNA.

После проведения экспериментов измерялась высота рифта и по инженерной методике рассчитывалась величина энергии разряда МИУ, необходимая для получения данной высоты рифта, которая сравнивалась с экспериментальным значением.

Моделирование процесса с помощью комплекса LS-DYNA показало результаты, хорошо согласующиеся с замерами высоты гофра, полученными экспериментальным путем.

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Инженерная методика позволяет с достаточной точностью рассчитывать процессы магнитно-импульсной формовки при толщине заготовки, превышающей глубину проникновения магнитного поля в материал заготовки.
2. Для расширения возможностей инженерной методики следует провести дополнительные исследования.
3. Комплекс LS-DYNA позволяет моделировать процессы магнитно-импульсной формовки при толщине заготовки значительно меньше величины глубины проникновения магнитного поля в материал заготовки.

Список литературы

1. Глущенков В.А., Карпухин В.Ф. Технология магнитно-импульсной обработки материалов : монография - Самара : Издательский дом "Федоров", 2014. – 208 с.
2. L'Eplattenier P., Cook G., Ashcraft C. Introduction of an Electromagnetism Module in LS-DYNA for Coupled Mechanical Thermal Electromagnetic Simulations //Proceedings of the 3 International Conference "High Speed Forming 2008", Dortmund, 2008, p. 85-96.
3. Карпухин В. Ф. Определение параметров магнитно-импульсной формовки // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева (национального исследовательского университета). – 2012. - №5 (36), часть 1. – С. 228-232.

## Разработка прибора измерения контактной разности потенциалов деталей авиационной техники

Фёдоров А.В.
Научный руководитель — к.т.н. Олешко В.С.
МАИ, Москва
aleksandr.fyodorov.97@gmail.co

На поверхности металла имеются, так называемые, электроны проводимости, находящиеся в постоянном беспорядочном движении, которые практически не выходят с поверхности металла при комнатной температуре, что объясняется увеличением потенциальной энергии электрона при удалении его от поверхности металла. Некоторые электроны постоянно покидают поверхность металла, а затем снова возвращаются, поскольку их потенциальной энергии недостаточно для преодоления некоего потенциального барьера. В результате металл оказывается окруженным электронным облаком, в котором действуют силы, направленные внутрь металла. Чтобы выпустить электрон с поверхности металла в условный вакуум, необходимо совершить работу против этих сил. Эта работа получила название работы выхода электрона или просто работы выхода.

Если два металла с разными работами выхода начнут контактировать друг с другом, то электроны проводимости из металла с меньшей работой выхода будут переходить в другой

металл с большей работой выхода. При этом первый металл зарядится положительно, а второй – отрицательно. В результате между этими двумя металлами устанавливается контактная разность потенциалов (КРП), которая выражает разность работ выхода электронов из этих двух контактирующих металлов.

Измерив КРП электронным прибором, имеющим датчик с заранее известной работой выхода, можно определить работу выхода электрона из контролируемого металла или сплава. По работе выхода электрона из контролируемого металла судят о состоянии его поверхности, в частности, о чистоте (что необходимо при склеивании, пайке, сварке, нанесении покрытий), о наличии и величине пластических деформаций, о триботехнических характеристиках и т.д.

В целях определения работы выхода электронов из металлических деталей авиационной техники, нами разрабатывается новый, специально адаптированный для этого, прибор измерения КРП.

Основную часть конструкции составляет электронная схема, которая позволяет контактирующему элементу датчика работать в высокочастотном автоколебательном режиме (наш прибор реализует метод динамического конденсатора), а также устройство, регистрирующее значение КРП.

При разработке прибора измерения КРП необходимо решить следующие задачи:

- выбрать способ колебаний контактирующего элемента датчика;
- выбрать способ точной регистрации КРП;
- разработать эффективную конструкцию и компоновку прибора;
- разработать технологию контроля авиационных деталей и другие.

## Влияние анизотропии на процесс вытяжки с принудительным утонением

Халикова А.А.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Звонов С.Ю.
СНИУ им. С.П. Королёва, Самара
alsu.khalikova.95@mail.ru

Современная концепция развития различных направлений промышленности и экономики способствует созданию производительных и конкурентоспособных способов получения различных изделий, соответствующие жестким требованиям по качеству и свойствами эксплуатации, при минимальной затрате материальных и энергетических ресурсов, а также трудовых затрат.

На сегодняшний день изготовления конических деталей с цилиндрическими поясками, применяемыми в двигателях летательных аппаратов, основано на процессах вытяжки, обжима и окончательной механической обработки. Однако такая технология не обеспечивает получение такой детали с утолщениями на кромках большого и меньшего диаметров.

Для совершенствования технологии, позволяющие получение большей толщины материала на цилиндрических участках детали, предлагается использовать процесс вытяжки листовой кольцевой заготовки с принудительным уменьшением толщины материала в зоне, которая при обжиме формирует коническую стенку. Заготовки, полученные вытяжкой с отверстием на донном участке, позволяют увеличить выход годного материала и снизить трудоемкость изготовления подобных изделий, а учет благоприятных сочетаний показателей анизотропии позволяет избежать увеличения размеров заготовок по диаметру и толщине, введения дополнительной операции обрезки фестонов и т. д.

Для изготовления подобных изделий в Самарском университете разработана методика проектирования процесса вытяжки с принудительным утонением для изотропного материала.

В работе проведен ряд моделирований процесса вытяжки, который показал, как изменяется усилие в зависимости от наличия отверстия и различного диаметра отверстия. Построены графики зависимости распределения толщин заготовок без отверстия и с диаметрами отверстий 9, 11, 13 мм от отношения длины образующей к радиусу заготовки для 1 и 2 стадии процесса. Эти данные позволяют проанализировать утонение стенки полой цилиндрической детали в зоне опасного сечения, а также определить усилия, при которых происходит отрыв донной части.

Таким образом, экспериментальные результаты исследования анизотропных свойств материала будут внесены в существующий теоретический расчет изотропного материала для анализа процесса вытяжки с принудительным утонением технологических и режимов прокатки и термообработки, которые обеспечат в листах сочетания коэффициентов анизотропии, удовлетворяющих требованиям интенсификации листоштамповочных операций.

Список использованных источников

1. Комбинированная глубокая вытяжка листовых материалов. / Валиев С. А. / М., «Машиностроение», 1973, 176 с.;
2. Теория обработки металлов давлением. Учебник для вузов. Изд. 4-е, переаб. и доп. / Сторожев М. В., Попов Е. А. / М., «Машиностроение», 1977 г, 423 с. с ил.;
3. Алюминиевые сплавы. Справочник / В. М. Белицкий, Г. А. Кривов. Под общей редакцией академика РАН Фридляндера / К:«КОМИНТЕХ», 2005, 365 с.;
4. Деформирование анизотропных материалов (Резервы интенсификации)/ Гречников Ф. В. / М.: Машиностроение, 1998.448с.:ил.;
5. Диссертационная работа: «Разработка процессов вытяжки с принудительным утонением плоской заготовки и последующего обжима для осесимметричных конических деталей с заданной толщиной стенки» / Звонов С. Ю./ Самар. гос. аэрокосм. ун-т, Самара, 2013,127 с.;
6. Алюминий и его сплавы: Учебное пособие / Сост. Луц А.Р., Суслина А.А.. / Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. – 81 с.:ил.;
7. Исследование способа формообразования деталей бочкообразной формы / Демьяненко Е.Г. / Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2014. № 2. С. 72-76.

## Исследование процесса шлифования криволинейных зубьев конических и гипоидных передач

Худяков А.А.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Калашников А.С.
Московский политехнический университет, Москва
adrei.khudiakov@yandex.ru

Конические и гипоидные передачи с криволинейными зубьями служат для передачи механической энергии между пересекающими и перекрещивающими осями валов. Так как они работают при значительных нагрузках и высоких окружных скоростях, поэтому их подвергают химико-термической обработки (ХТО), включающей цементацию (нитроцементацию) и закалку. В процессе ХТО конические и гипоидные передачи значительно деформируются, точность и плавность зацепления зубьев снижаются, форма и расположение пятна контакта не стабильны от зуба к зубу.

С целью устранения погрешностей зубьев, возникших при ХТО, конические и гипоидные зубчатые колёса подвергают чистовой обработке – зубопритирке и зубохонингованию. Однако исправляющие способности зубопритирки и зубохонингования

незначительны, поэтому конические и гипоидные передачи не являются полностью взаимозаменяемыми и требуется подбор в пары.

Процесс зубошлифования обладает большими технологическими возможностями обеспечивает полную взаимозаменяемость, 4-6 степень точности и шероховатость поверхности Ra 0,3-1.6 мкм. Однако зубошлифование является теплонапряжённым процессом и сопровождается структурными изменениями в поверхностном слое обрабатываемого материала в виде прижогов и термических микротрещин.

Для снижения теплонапряжённости процесса зубошлифования в работе были проведены исследования высокопористых шлифовальных кругов, структурное строение которых характеризуется увеличением порового пространства и уменьшением объёма абразивного зерна. Исследования показали, что высокопористые круги марки 25А16ПСМ110К позволяют значительно снизить теплонапряженность процесса зубошлифования.

## Исследование механических свойств дендритов α-твердого раствора в сплаве АК12 методом сканирующей зондовой микроскопии

Чаплыгин К.К.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Воронин С.В.
СНИУ им. С.П. Королёва, Самара
chapkostya96@mail.ru

Одним из самых распространенных технологических процессов в цикле получения изделий из алюминиевого сплава АК12 является литье. Как правило, в литых изделиях, в результате градиента температур по сечению, образуются зоны, микроструктура которых имеет дендритное строение. Ликвидировать данные области, в некоторых случаях, технологически невозможно. Важным является оценка влияния дендритов на эксплуатационные свойства изделий. Для этого необходимо исследовать механические свойства дендритов в зависимости от ориентации их роста. Одним из способов оценки механических свойств дендритов в зависимости от ориентации их роста является сканирующая зондовая микроскопия.

Поэтому целью данной работы являлось определение механических свойств дендритов α-твердого раствора сплава АК12 в зависимости от их кристаллографической ориентации при помощи сканирующей зондовой микроскопии.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Выявить микроструктуру поверхности образца на поперечном сечении отливки и на боковой поверхности.
2. Провести сканирование с помощью нанотвердомера «СуперНаноСкан» на поперечном сечении отливки и на боковой поверхности, с целью получения изображения карты профиля исследуемой поверхности.
3. Определить модуль упругости дендрита в зависимости от его ориентации относительно направления подвода индентора.

В качестве объекта исследования была выбрана отливка диаметром 20 мм и высотой 100 мм. Из срединной части отливки был вырезан образец диаметром 20 мм и высотой 8 мм. Подготовка поверхности образца на поперечном сечении отливки и на боковой поверхности осуществлялась методом механического полирования на фетровом круге с последующим электрополированием в растворе из 40%-ой плавиковой кислоты, борной кислоты и дистиллированной воды. С помощью оптического металлографического микроскопа были получены изображения микроструктуры на поперечном сечении отливки и на боковой поверхности. Изображение микроструктуры с поперечной поверхности образца характеризовалось наличием дендритов α-твердого раствора в виде светлых пятен вытянутых от периферии образца к центру, что соответствует основным закономерностям

формирования структуры в отливках. На изображении микроструктуры с боковой поверхности образца наблюдались поперечные разрезы дендритов в виде светлых участков, преимущественно овальной формы.

Затем исследуемые поверхности подвергались сканированию с помощью нанотвердомера «СуперНаноСкан» со скоростью 15 мкм/сек на участках 128x128 мкм. В результате были получены карты профиля исследуемых поверхностей. Микроструктура на полученных изображениях полностью идентична изображению микроструктуры полученной на оптическом металлографическом микроскопе.

Используя методику измерения модуля упругости снятием кривых подвода индентора к поверхности образца, производились серии измерений модуля упругости перпендикулярно направлению кристаллизации дендрита и по направлению кристаллизации, т.е. измерения проводились на поперечном сечении отливки и на боковой поверхности соответственно. В ходе измерений было установлено, что перпендикулярно направлению роста были получены значения от 65 до 71 ГПа, а по направлению роста дендрита модуль упругости составлял от 60 до 62 ГПа.

В результате проведенных исследований были определены механические свойства дендритов α-твердого раствора в двух направлениях. Полученные значения планируется использовать для оценки влияния дендритов на напряженно-деформированное состояние методом конечно-элементного моделирования. Также, используя зависимость кристаллографической ориентации монокристалла алюминия от значений модуля упругости, было сделано предположение, что направление нормали к поверхности дендрита соответствует кристаллографическому направлению [110], а направление вдоль дендрита соответствует кристаллографическому направлению [100].

## Применение компьютерного моделирования при автоматизации технологических процессов в машиностроении

Чечуга А.О.
Научный руководитель — к.т.н. Маркова Е.В.
ТулГУ, Тула
antonchechuga@yandex.ru

Для выполнения технологического процесса используются соответствующие технологические системы как совокупности технологических машин, инструментов и технологической оснастки. Применяемое в производстве технологическое оборудование отличается уровнем автоматизации - от технологических машин (станков) с непосредственно ручным управлением до комплексов «безлюдного» производства с полной автоматизацией циклов обработки.

Востребованность и эффективный уровень автоматизации технологического оборудования в значительной степени зависят от объекта и серийности производства, уровня конкурентоспособности предприятия и его «авторитетности» на рынке продукции конкретного вида, которая напрямую зависит от стабильности качества этой продукции и способности менеджмента предприятия к значительным количественным увеличениям программы выпуска в кратчайшие сроки. Всем этим требованиям в условиях массового и серийного машиностроительного производства соответствует автоматизированное оборудование: полуавтоматы, автоматы и состоящие из них автоматические линии. Наиболее высоким уровнем автоматизации здесь следует признать применение технологического оборудования с ЧПУ.

В настоящее время для осуществления компьютерного моделирования изделий сложной формы и последующего производства чертежей и необходимых управляющих программ для

станков с ЧПУ применяют современные комплексы CAD и CAE. Использование данных комплексов ускоряет проектирование сложных технологических конструкций.

Использование современных методов вычис¬лений, реализованных в комплексах CAD, дает возможность проводить исследова¬ния различных характеристик проектируемых объектов, что позволяет менять конструкцию этих объектов без создания экспериментальных образцов и не прибе¬гать к длительной и дорогостоящей процедуре натурных исследований.

Комплекс МКЭ ANSYS широко используется для проектирования изделий, к которым предъявляются повышенные эксплуатационные требования. С помощью данного комплекса можно производить расчеты напряжений, деформаций, форм и частот собственных колебаний конструкций, используя метод конечных элементов.

Расчет конструкций проводят, используя данные о геометрии исследуемой конструкции, а также результаты вычисления прилагаемых сил и нагрузок и физико-механические характеристики используемого материала.

Выполнение расчета в пакете ANSYS может быть для любого состояния конструкции: и для динамического, и для статического. Это позволяет получить необходимые сведения о значениях прочностных характеристик моделируемого изделия без дополнительных экспериментов и на этом основании внести в его конструкцию необходимые для улучшения качества продукции изменения с экономической оптимизацией изделия.

Освоение инструментов компьютерного инженерного моделирования, к которым относится программа ANSYS, позволяет с большой экономической выгодой выполнять научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, исключая проведение натурных испытаний, которые не всегда оправдывают вложенные затраты.

## Статистическое исследование взаимосвязи механических свойств поковок титанового сплава Ti-10V-2Fe-3Al

Чибисова Е.В., Уханова А.М., Перепонов А.М.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Егорова Ю.Б.
Ступинский филиал МАИ, Ступино
echibisova@mail.ru

Важную роль в современном материаловедении играет использование методов математического моделирования для прогнозирования свойств металлов и сплавов. Такой подход позволяет предсказывать параметры сплавов ещё до начала физических экспериментов, быстрее находить новые эффективные материалы, проводить исследования более доступными и менее дорогими способами.

В данной работе приводятся результаты поиска корреляций между механическими свойствами высоколегированного псевдо-β-сплава Ti-10V-2Fe-3Al. Рассмотрена взаимосвязь прочностных (пределы текучести и прочности σ0,2 и σв) и пластических свойств (относительное удлинение δ, поперечное сужение ψ), а также вязкости разрушения K1C, т.к. на практике по этим показателям делается заключение о допуске материала на изделие. Материалом для исследования послужили 1560 промышленных поковок одного типа и размера, изготовленные в 2007-2016 гг. Поковки подвергались закалке с T = 760-800 °C (3 ч., охлаждение в воде) и старению при T = 500-515 °C (8 ч., охлаждение на воздухе). Также был проведен анализ 47 образцов сплава, данные по которым были опубликованы в российских и зарубежных литературных источниках (закалка в воду с температур 700-820 °C, старение при 400-600 °C, охлаждение на воздухе). Статистический анализа проводили с помощью специализированного пакета «Statistica» На первом этапе была проведена первичная статистическая обработка данных, построены гистограммы, проанализирован химический состав и свойства образцов, удалены «дикие» значения. Статистические характеристики

исследованных факторов практически не зависят от года выпуска, хотя можно отметить незначительное снижение разброса практически всех факторов в 2015-16 гг. Прочностные и пластические свойства изменяются в довольно широких пределах. Так, например, абсолютная разница между максимальным и минимальным значениями предела прочности и условного предела текучести может достигать ~230 МПа, стандартное отклонение – 29 МПа, что сопоставимо с литературными данными. Более высокий разброс значений имеют вязкость разрушения и пластические свойства. Для этих характеристик максимальные значения в 2-8 раз выше минимальных. Высокий разброс механических свойств может быть связан с колебаниями марочного состава и режимов термической обработки.

Результаты корреляционно-регрессионного анализа промышленных данных показывают, что повышение предела прочности на 100 МПа приводит к увеличению σ0,2 на 90 МПа, снижению относительного удлинения на 2,3 %, поперечного сужения на 8 %, вязкости разрушения на 4 МПа·√м·. Рост относительного удлинения на 10% означает также увеличение поперечного сужения на 30-31 %. Значения, полученные по литературным данным, оказались практически идентичными. Коэффициенты корреляции для σ0,2 и σв составляют 0,94-0,97, для δ и ψ – 0,81-0,84. Связь между пластическими и прочностными свойствами оказалась менее сильной, коэффициент корреляции составляет ≈ 30-35% (доля вариации 9-12 %).

## Статистическое исследование химического состава слитков титанового сплава ВТ22

Шмырова А.В., Кононова И.С.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Егорова Ю.Б.
Ступинский филиал МАИ, Ступино
nika19.75@mail.ru

Цель работы состояла в установлении статистических средних значений содержания легирующих элементов, примесей и их колебаний в слитках сплава ВТ22, изготовленных по промышленной технологии с 2009 по 2011 годы. В качестве статистических данных использовали выписки их шихтового журнала и результаты промышленного контроля. Объектами исследования послужили 24 слитка сплава ВТ22. Слитки были выплавлены методом тройного вакуумного дугового переплава (ВДП) по промышленной технологии на ООО «СТК» в 2009-2011 гг. Для выплавки слитков использовали губку марок ТГ110 и ТГ120, лигатуру К-5-1, К-5-1Д, К-5-2Д, стружку в количестве 600 г.

В ходе статистического анализа, проведенного с помощью ППП «Statistica», определяли диапазон по факту, размах, выборочное среднее, выборочную дисперсию, стандартное отклонение, коэффициент вариации; проводили проверку соответствия эмпирического распределения и нормального распределения.

Полученные результаты показали, что среднее содержание и диапазоны легирования основными компонентами не выходят за нормативные пределы по ОСТ1 90013-81. Однако для Al и Mo максимальные значения совпадают с верхней границей нормативного диапазона легирования. Размах соответствует 0,55% для алюминия, 0,74% для молибдена, 0,5 % для ванадия, 0,3 для хрома, 0,5 для железа. Коэффициент вариации для Al, Mo и V лежит в интервале 2,6-3,7 %, что свидетельствует о достаточно высокой однородности химического состава в пределах марки сплава и удовлетворяет требованиям Руководства Р СЦМ-04-2010 (≤7%). Однако для Cr и Fe коэффициент вариации более 7% и составляет 11 и 16% соответственно.

Наблюдаются значимые смещения гистограмм и выборочных средних значений содержания Al и Mo от среднего по ОСТ1 90013-81: для алюминия (больше на 0,32%); для молибдена (больше на 0,31%). Стандартное отклонение для основных компонентов равно

S=0,1-0,19%, статистический (трехсигмовый) интервал легирования 6S=0,7-1,14%, что составляет 0,9-1,3 от величины поля допуска. Содержание азота во всех слитках одинаковое и составляет 0,01%, циркония – менее 0,01%. Для остальных примесей коэффициент вариации лежит в интервале 20-33%, что значительно выше требования Руководства Р СЦМ-04-2010 (≤15%). Наиболее сильные колебания обнаружены для кислорода. Его содержание изменяется от 0,05 до 0,13% и не выходит за установленные пределы, при этом в 2011 году все слитки имели содержание кислорода 0,05-0,06%. Суммарное содержание примесей внедрения, эквивалентное алюминию, изменялось от 0,9 до 1,7% (среднее =1,1%).Структурные эквиваленты по алюминию и молибдену, характеризующие суммарное содержание α- и β-стабилизаторов и нейтральных упрочнителей в сплаве ВТ22, изменяются в пределах =6,2-6,9% и =11,4-13,0%.

В работе были разработаны рекомендации по повышению качества слитков сплава ВТ22 на основе вероятностно-статистических методов. Хотя объем выборки недостаточно представителен (24 слитка), можно порекомендовать среднее содержание легирующих элементов, которые исключают возможность появления брака по верхнему пределу.

# Секция №8.6 Механика и моделирование материалов и технологий

## Пневмоформовка листовых конструкций из высокопрочных цветных сплавов в режиме кратковременной ползучести

Аккуратнова А.С.
Научный руководитель — доцент, д.т.н. Ларин С.Н.
ТулГУ, Тула
sulee@mail.ru

Конструкции ответственного назначения, в основном состоящие из нескольких слоев, каждый из которых является листом высокопрочного цветного сплава, весьма востребованы при изготовлении деталей повышенной удельной прочности. Сравнивая их с конструкциями, полученными в ходе пайки или клепки, можно отметить, что они отличаются заметно меньшей массой, трудоемкостью получения и большей надежностью. Рациональной технологией производства многослойных, и в частности трехслойных, конструкций является их формоизменение инертным газом в безвоздушном пространстве или пространстве, заполненном инертными газами, изначально соединенных различными видами сварки.

Можно выделить несколько способов изготовления трехслойных листовых конструкций пневмоформовкой:

- деформирование листов на гидравлическом прессе с приданием им трапециевидной формы, диффузионная сварка с дальнейшей калибровкой конструкции газом;
- деформирование одного из наружных слоев, к которому в требуемых местах приварен внутренний. При этом внутренний слой, то есть заполнитель растягивается. При этом образуются полости, форма которых близка к требуемой. Процесс осуществляют созданием давления газа, подаваемого в пространство между листами.

В работе рассмотрен процесс формоизменения трёхслойной конструкции с каналами трапециевидной формы, слои которой характеризуются анизотропией в режиме ползучести при вязком течении. При расчете упругими составляющими пренебрегаем.

Деформирование трапециевидного канала в трехслойной конструкции осуществляется под воздействием давления газа, которое меняется в соответствии с законом нагружения. Принято допущение, что ассоциированный закон течения справедлив при кратковременной ползучести. Под кратковременной ползучестью понимается медленное деформирование в условиях вязкого или вязкопластического течения, упругими составляющими деформации пренебрегаем. Материал деформируемого изделия считается ортотропным с главными осями анизотропии.

Предполагается, что материал при пневмоформовке проявляет либо вязкие, либо вязкопластические свойства.

Выведены выражения, с использованием которых выполнен анализ силовых режимов и геометрических размеров изготавливаемого изделия при формообразования и одновременной калибровке в условиях постоянного температурного интервала листовых трехслойных изделий с трапециевидным внутренним сечением. Расчеты проведены для ряда труднодеформируемых цветных сплавов.

Выполнено моделирование процесса формоизменения листовых трехслойных изделий с трапециевидным внутренним сечением, слои которой характеризуются анизотропией в режиме ползучести при вязком течении, по результатам которого получены выражения для оценки силы и параметров качества получаемых изделий. Установлено влияние времени деформирования на относительные величины давления газа, толщины заполнителя и угла конуса полости трапециевидного элемента.

Работа выполнена в рамках грантов РФФИ № 16-08-00020.

## Волны Рэлея на границе градиентно-упругого полупространства и их возбуждение движущимся источником

Антонов А.М.
Научный руководитель — профессор, д.ф-м.н. Ерофеев В.И.
ИПФ РАН, Нижний Новгород
yulich-16@mail.ru

В двумерной постановке решена задача о распространении упругой поверхностной волны на границе градиентно-упругого полупространства (т.е. обобщенного континуума, напряженно-деформированное состояние которого описывается тензором деформаций, вторыми градиентами вектора перемещений, несимметричным тензором напряжений и тензором моментных напряжений). Решение уравнений отыскивалось в виде суммы скалярного и векторного потенциалов, причем у векторного потенциала отлична от нуля только одна компонента. Показано, что такая волна, в отличие от классической волны Рэлея, обладает дисперсией. Вычислена зависимость фазовой скорости поверхностной волны от волнового числа, проведено ее сравнение с дисперсионной характеристикой фазовой скорости объемной сдвиговой волны. Рассчитаны напряжения и перемещения, возникающие в зоне распространения поверхностной волны. Показано, что скорость поверхностной волны, распространяющейся вдоль свободной границы градиентно-упругого полупространства, может превосходить скорость объемной сдвиговой волны, вычисляемую как радикал отношения модуля сдвига к плотности материала. Однако в рассматриваемой среде сдвиговая волна также обладает дисперсией, и значение указанной скорости является лишь нижним пределом ее фазовой скорости. Таким образом, в градиентно-упругой среде фазовая скорость поверхностной волны не может превосходить фазовую скорость объемной сдвиговой волны, но, при определенных значениях волнового числа, может достигать ее.

Изучаются особенности генерации волн источником возмущений, движущимся вдоль границы градиентно-упругого полупространства.

Работа выполнялась при поддержке Российского научного фонда (грант № 14-19-01637).

## Математическая модель деформирования ГПУ-поликристалла с учётом обратных напряжений

Баранов М.А.
Научный руководитель — доцент, к.ф-м.н. Волегов П.С.
ПНИПУ, Пермь
maximbaranov.123@gmail.com

Титан и его сплавы обладают оптимальным соотношением высокой прочности и относительно небольшой плотности, вследствие чего являются одними из наиболее популярных материалов в авиационной и аэрокосмической отраслях. В силу этого актуальным становится изучение прочностных характеристик и дефектной структуры таких материалов. В работе сделан акцент на изучение процессов упрочнения, которые, с одной стороны, проявляются на уровне макроскопических свойств образца или конструкции, а с другой стороны, на уровне кристаллической решетки обусловлены появлением и эволюцией полей внутренних напряжений, создаваемых барьерами различного типа, в том числе – дислокационными барьерами. Таким образом, целью работы является разработка математической модели деформирования металла с ГПУ решёткой с учетом внутренних («обратных») напряжений.

Появление обратных напряжений вызвано, в первую очередь, образованием дислокационных барьеров и создаваемыми ими полями напряжений, поэтому для корректного определения обратных напряжений важно понимать, с какими конкретно

взаимодействиями и реакциями связано образование барьеров того или иного типа. Следовательно, одной из задач исследования была классификация барьеров в ГПУ решётках.

При деформировании моно- или поликристаллов как результат различных дислокационных реакций возникают различные дислокационные барьеры, которые, в свою очередь, взаимодействуют с другими дислокациями, барьерами или дефектными субструктурами. Поля напряжений таких структур обуславливают появление т.н. «обратных», или внутренних напряжений (в англоязычной литературе – «back stresses»), а обратные напряжения, в свою очередь, приводят к необходимости учета эффективных сдвиговых напряжений, которые находят как разность приложенных внешних напряжений на системе скольжения и обратных напряжений.

Описание перечисленных выше эффектов было включено в модификацию двухуровневой упруговязкопластической модели неупругого деформирования ГПУ поликристалла, где в качестве элемента макроуровня рассматривается представительный объем поликристалла, а элементом мезоуровня выступает отдельный однородный кристаллит. Считается, что основной вклад в неупругое деформирование вносит движение дислокаций по кристаллографическим системам скольжения. В качестве определяющего соотношения на каждом из масштабных уровней используется закон Гука в скоростной релаксационной форме. Напряжения на макроуровне определяются осреднением напряжений в элементах мезоуровня. Для связи уровней принята расширенная гипотеза Фойгта, согласно которой меры скорости деформации всех зерен совпадают с мерой скорости деформации представительного объема поликристалла.

В результате серии численных экспериментов по деформированию представительного объема поликристалла с ГПУ решёткой получены зависимости интенсивности напряжений от интенсивности деформации. Параметры материала соответствовали α-Ti. Получены оценки для обратных напряжений, создаваемых барьерами различного типа.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-1298.2017.1.

## Влияние размера внутреннего дефекта микроструктуры на усталостные свойства титанового сплава ВТ3-1

Барсегян О.С.
Научный руководитель — к.т.н. Никитин А.Д.
МАИ, Москва
different_ovik@mail.ru

Экспериментальное исследование конструкционных материалов в области сверхмногоцикловой усталости (СВМУ) показало, что при малых амплитудах (по сравнению с пределом текучести) и больших долговечностях (порядка 108 – 1010 циклов) происходит качественная смена механизма зарождения усталостной трещины: в отличие от области многоцикловой усталости (МНЦУ) [1-3], где трещина зарождается на поверхности изделия, при СВМУ нагружении зарождение происходит во внутренних объемах материала. При подповерхностном зарождении, доминирующую роль в процессе формирования очага трещины играют дефекты микроструктуры, такие как неметаллические включения (преимущественно для сталей), литейные дефекты, поры (для алюминиевых сплавов) и кластеризация (для никелиновых и титановых сплавов). При этом было показано, что в случае неметаллических включений, усталостная прочность материала может быть оценена по значению его микротвердости, размеру и геометрическим особенностям внутреннего дефекта [4].

Показано, что подповерхностное зарождение усталостных трещин в области СВМУ для материалов без внутренних дефектов (включений) так же возможно. При этом зарождение

трещины связано с наличием микроструктурной неоднородности материала (крупных альфа - пластин, агломераций структурных элементов, макро - зон и т. д.). При этом усталостное поведения материала со сложной микроструктурой характеризуется существенным разбросом экспериментальных значений усталостной прочности. Разброс по долговечности может составлять до трех порядков при заданном уровне напряжений. Таким образом, существует ярко выраженная область, в которой нарушается однозначное соответствие между уровнем напряжений и усталостной долговечностью. Данные области принято называть «областями бифуркации» [5].

В настоящей работе проводится анализ дефектов титанового сплава ВТ3-1 с целью определения предела усталости по формулам, предложенным в [4]. Оценивается максимальное значение предела усталости, соответствующее минимальным структурным неоднородностям титанового сплава ВТ3-1, а так же определение минимальных значений, характерных для дефектов максимального размера (агломераций). Полученные расчетные значения сравниваются с экспериментальными данными для СВМУ нагружения титанового сплава ВТ3-1 [6]. В результате исследования дается оценка величины зоны бифуркации для указанного сплава в области СВМУ нагружения.

## Определение остаточного ресурса подкраново-подстропильной фермы с учетом накопления повреждений в реальных условиях эксплуатации

Бриккель Д.М.
Научный руководитель — профессор, д.ф.-м.н. Ерофеев В.И.
ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород
archive.94@mail.ru

Объектом настоящего исследования является подкраново-подстропильная ферма (ППФ) пролетом 36 метров с неразрезным многопролетным нижним поясом коробчатого сечения. Цель работы состоит в определении напряжённо – деформируемого состояния конструкции и разработке уточнённой методики оценки остаточного ресурса ППФ на стадии образования усталостной трещины и определение межремонтного периода.

Разработана конечно-элементная модель ППФ. По результатам статического расчета конструкции проанализировано ее напряженно-деформированное состояние и определено расположение опасных зон концентрации напряжений. Установлена наиболее опасная область – узел сопряжения решетки с нижним поясом фермы.

За меру поврежденности принимается скалярный параметр, характеризующий относительную долю микродефектов в эталонном объеме материала. Этот параметр равен нулю, когда повреждения отсутствуют, и близок к единице в момент образования макродефектов, способствующих разрушению конструкции [1]. Под поврежденностью при данном подходе понимается сокращение упругого отклика тела вследствие сокращения эффективной площади, которое обусловливается появлением и развитием распределенных по объему материала микродефектов [2-6].

Для определения количества циклов до разрушения используется кривая усталости Веллера, полученная экспериментально.

По результатам расчета установлены параметры поврежденности конструкции за определенные периоды времени: повреждения, накапливаемые за 1 цикл, за 1 рабочий день, а также повреждения, соответствующие разрушению конструкции.

Согласно технологии, за 1 день (2 смены) кран совершает 30 рабочих циклов. Количество рабочих дней в году – 244, откуда следует, что количество дней безаварийной работы крана составляет 1 944 дня, или 7 лет и 236 дней.

Предложенная методика позволяет определить остаточный ресурс конструкции в эксплуатационных условиях, осуществить своевременное реагирование по принятиям

решений для дальнейшей эксплуатации или снятия подкраново-подстропильной фермы с работы.

Работа выполнялась при поддержке Российского научного фонда (грант № 14-19-01637).

Литература:

1. Ерофеев, В. И. Самосогласованная динамическая задача оценки поврежденности акустическим методом / В. И. Ерофеев, Е. А. Никитина // Акустический журнал. – 2010. – Т. 56, № 4. – С. 554–557.

2. Голуб, В. П. Определяющие уравнения в нелинейной механике поврежденности / В. П. Голуб // Прикладная механика. – 1993. – Т. 29, № 10. – С. 37–49.

3. Хорошун, Л. П. Основы микромеханики повреждаемости материала. Длительная повреждаемость / Л. П. Хорошун // Прикладная механика. – 2007. – Т. 43, № 2. – С. 1–2.

4. Качанов, Л. М. Основы механики разрушения / Л. М. Качанов. – Москва : Наука, 1974. – 311 с.

5. Коллинз, Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение / Дж. Коллинз. – Москва : Мир, 1994. – 624 с.

6. Ерофеев, В. И. Влияние поврежденности материала на эволюцию акустической волны / В. И. Ерофеев, Е. А. Никитина, П. А. Хазов // Приволжский научный журнал / Нижегор. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Нижний Новгород, 2015. – № 2. – С. 32–42

## Отслоение покрытия при нагружении

Буртасова М.В.
Научный руководитель — доцент, д.ф-м.н. Устинов К.Б.
МАИ, Москва
marina-burtasova@mail.ru

Работа посвящена исследованию механических свойств термозащитных покрытий. Под действием циклически меняющихся температур в них возникают остаточные напряжения, обусловленные, различием процессов релаксации в покрытии и подложки, которые могут приводить к нарушению адгезионного контакта на границе раздела и, как следствие, отслоению покрытия.

При моделировании развития отслоений обычно отслоившийся слой рассматривают как защемленную по краям пластину [1-4]. В случае основания прямолинейной формы для описания деформирования пластины обычно используют теорию Кармана, для оснований, имеющих кривизну, - теорию слабо искривленных пластин Донелла-Муштари-Власова. При этом особое внимание уделяется постановке граничных условий, записываемых в наиболее общем случае в виде обобщенной упругой заделки – пропорциональности угла поворота и компонент вектора смещения в точке закрепления действующему моменту и главному вектору усилий, действующих в данной точке. Связь кинематических и силовых параметров при этом осуществляется с помощью матрицы (3x3) коэффициентов податливости [2-4].

Для цилиндрического упругого основания методом конечных элементов найдены коэффициенты упругой заделки в зависимости от параметров: отношения модулей покрытия и основания, отношения толщины покрытия к протяженности отслоения, отношения толщины покрытия к радиусу кривизны. Для полученных значений построены аппроксимирующие зависимости. Проведено сравнение с существующими решениями. При уменьшении отношения протяженности отслоения к радиусу кривизны полученные зависимости, как и следовало ожидать, переходят в зависимости для плоских оснований [3, 4].

Литература:

1. Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М. Отслоение покрытий под действием термоупругих напряжений. (Балочное приближение)// Вестник СамГу – Естественнонаучная серия. -2007. -№4(54).-С. 66-83.

2. Устинов К.Б. О расслоении полосы по границе раздела упругих свойств. Часть 1. Постановка задачи, случай нормального отрыва// Вестник ПНИПУ. Механика. -2015.-№4.-С.226-245.

3. Устинов К.Б., Каспарова Е.А. Оценка влияния кривизны и податливости основания на параметры отслоения покрытия // Деформация и разрушения материалов. – 2015.- №3.-С. 28-35.

4. Устинов К.Б. Об отслоении слоя от полуплоскости; условия упругой заделки для пластины, эквивалентной слою // Изв. РАН. МТТ. – 2015. – № 1. – С. 75-95

## Расчет упругопластической посадки колец

Бухалов В.И.
Научный руководитель — профессор, д.ф-м.н. Попов А.Л.
МАИ, Москва
vlad.buhalov@yandex.ru

При изучении нагруженных металлических образцов наиболее важным являются окрестности возле отверстий, поскольку на границах отверстий могут возникнуть напряжения, достигающие предела текучести. Одним из типов такого нагружения является посадка двух цилиндров с натягом. Ранее задача о посадке цилиндров рассматривалась в упругой постановке [1].

В докладе представлено решение задачи о посадке двух цилиндрических колец с натягом в упругопластической постановке. Рассматривались два кольца: внутреннее – из ст. 20 с пределом текучести 250 МПа, наружное – из закаленной ст. 40 с пределом текучести около 700 МПа. Посадка осуществлялась с натягом, обеспечивающем во внутреннем теле без отверстия напряжение равное 0.9σу. При создании во внутреннем теле центрального отверстия напряжения в нем за счет эффекта концентрации в зоне вблизи отверстия достигали предела текучести.

Для расчета НДС в этом случае потребовалось рассмотрение трех областей: 1) между внутренним отверстием и заранее неизвестной круговой границей пластической зоны, 2) между границей пластической зоны и внешней границей внутреннего кольца, 3) наружного кольца. Сложность задачи по сравнению упругопластической задачей Ламе, которая решена, например, в [2], состояла в том, что контактное давление при создании отверстия становилось неизвестным, наряду с радиусом пластической зоны.

Для определения неизвестных была в общем виде решена упругопластическая задача Ламе при некотором давлении на наружном контуре внутреннего кольца. Затем выписаны выражения для радиальных перемещений обоих цилиндров на границе их контакта. Эти выражения были приравнены величине радиального натяга, который остался неизменным при создании центрального отверстия. В результате было получено недостающее уравнение для определения контактного давления.

Конкретный расчет для соотношения размеров: радиус отверстия 1.5 мм, радиус внутреннего кольца 10 мм, радиус наружного кольца 25 мм показал, что радиус пластической зоны сократился с 4.3 мм (для упругопластической задачи Ламе) до 3.6 мм, а контактное давление снизилось до 0.87σу.

Таким образом, построенное решение задачи об упругопластической посадки колец позволяет уточнить известные результаты решения такой задачи в упругой области.

Литература:

1. Гадолин А.В. Теория орудий, скрепленных обручами // Артилл. журн. 1861. - №12. – с. 1033-1071.
2. Малинин Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. - М.: Машиностроение, 1975. - 400 с.

## Масштабные эффекты для тепловых напряжений в круглом диске с отверстием при осесимметричном стационарном температурном поле в рамках микродилатационной теории упругости

Волков А.В.
Научный руководитель — к.ф-м.н. Соляев Ю.О.
ИПРИМ РАН, Москва
volkov.9291@mail.ru

В докладе рассмотрено решение задачи нахождения температурных напряжений в круглом диске с отверстием при осесимметричном стационарном температурном поле в рамках микродилатационной теории упругости (теории упругости с порами). Теория описывает материалы с однородно распределёнными по объёму порами. Когда объём пор падает до нуля, теория сводится к линейной теории упругости. Основной новой чертой теории является введение дополнительной независимой кинематической переменной: объёмного содержания пористости. Помимо параметров Ламе появляются три дополнительных неклассических физических параметра. Микродилатационная теория упругости предсказывает появление масштабных эффектов при различных случаях нагружения. Так, например, масштабные эффекты возникают для задачи чистого изгиба в рамках микродилатационной теории упругости. Существует множество материалов, для которых можно ожидать появления эффектов, предсказанных теорией (пенометаллы, пористые и волокнистые керамики и др.). Однако до сих пор существует мало экспериментов, пытающихся выявить неклассические эффекты, возникающие в теории. В докладе представлено аналитическое и численное решение задачи термоупругости с микродилатацией для круглого диска с отверстием. Для численного решения использован метод конечных элементов. Конечноэлементное решение может быть использовано для предсказания результатов экспериментов необходимых для нахождения неклассических параметров теории. Численное решение построено с помощью программы конечноэлементного моделирования Comsol. Изучены масштабные эффекты, возникающие в рамках теории упругости с микродилатацией (теории упругости с порами). Проведено сравнение решений в рамках классической и микродилатационной теории упругости.

## Изменчивость модуля Юнга и коэффициентов Пуассона цилиндрически-анизотропных хиральных трубок из моноклинных кристаллов

Волков М.А.
Научный руководитель — профессор, д.ф-м.н. Городцов В.А.
ИПМех РАН, Москва
Volkovmikhl@gmail.com

Коэффициент Пуассона для изотропных материалов ограничен между -0.5 и 1, а для анизотропных материалов строгих ограничений на его величину нет. Материалы с отрицательным коэффициентом Пуассона называются ауксетиками. Коэффициент Пуассона большинства известных кристаллов принимает отрицательные значения лишь для некоторых направлений.

Механическое поведение нано/микротрубок в рамках механики сплошных сред часто описывают как деформацию цилиндрических оболочек. В работе использована альтернативная модель криволинейно-анизотропного полого стрежня [1,2]. Считается, что трубки получены в результате сворачивания кристаллических пластин. Считается, что направления осей кристаллографической системы координат в плоскости пластины могут не совпадать с её гранями и отличаться на некоторый угол. В результате сворачивания таких пластин, получившиеся трубки являются хиральными и обладают цилиндрической анизотропией.

Выполнен анализ задач радиально-неоднородного растяжения цилиндрически-анизотропных хиральных трубок из моноклинных кристаллов. Получены зависимости модуля Юнга и коэффициентов Пуассона от постоянных упругости кристалла, отношения внешнего и внутреннего радиусов, угла хиральности и радиальной координаты. На основании экспериментальных значений постоянных упругости кристалла из справочника [3] в рамках теории упругости получены оценки модуля Юнга и коэффициентов Пуассона, соответствующих деформации в радиальном и угловом направлениях. Выявлены трубки, коэффициент Пуассона которых может принимать отрицательные значения и определены значения параметров, при которых данный коэффициент становится отрицательным.

Работа выполнена в рамках Государственного задания АААА-А17-117021310373-3.

Литература:

1. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела. М: Наука, 1977, 416с
2. Гольдштейн Р.В., Городцов В.А., Лисовенко Д.С. К описанию многослойных нанотрубок в рамках моделей цилиндрически анизотропной упругости // Физическая мезомеханика, 2009, Т. 12, №5, С. 5–14.
3. Landolt-Börnstein. Group III: Crystal and Solid State Physics. 29a. Second and Higher Order Constants // Berlin, Springer, 1992.

## Теоретические аспекты применения волн Похгаммера–Кри в задачах неразрушающей диагностики

Гаджибеков Т.А.
Научный руководитель — профессор, д.ф-м.н. Кузнецов С.В.
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва
90-region@mail.ru

Анализируются теоретические аспекты применения акустических волн Похгаммера–Кри в неразрушающей диагностике. Основное внимание уделяется продольным аксиально симметричным гармоническим модам. Впервые дается анализ дисперсионных кривых для стержней, выполненных из ауксетиков (материалов с отрицательным коэффициентом Пуассона).

Надо отметить, что именно продольные аксиально симметричные моды волн Похгаммера – Кри часто применяются в качестве экспериментального метода, как для неразрушающего определения механических свойств материалов, так и для диагностики наличия дефектов.

В случае неразрушающего определения механических свойств материалов, как правило, используют два цилиндрических длинных стержня Гопкинсона (называемых иногда стержнями Кольского), между которыми размещают исследуемый образец, как правило, также цилиндрической формы.

При ударном воздействии, приложенном к левому торцу первого стержня Гопкинсона, распространяется импульс со скоростью близкой к второй предельной скорости, далее на интерфейсной границе между первым стержнем и образцом часть энергии, переходит в образец, а часть отражается. На следующей границе между образцом и вторым стержнем

Гопкинсона происходит аналогичное явление. Было установлено, что в случае длиннопериодных импульсов, приложенных к одному из торцов стержня Гопкинсона, низкочастотные составляющие фундаментальной моды, распространяющиеся с большей скоростью, имеют и большие амплитуды. Известны обобщения на случай применения стержней Гопкинсона для экспериментальных исследований, связанных с возбуждением и распространением крутильных мод волн Похгаммера – Кри.

Задачи обнаружения дефектов в трубах и слоистых коаксиальных цилиндрах также основаны на генерировании в основном продольных аксиально симметричных волн Похгаммера – Кри и исследовании либо их отражения от локализованных дефектов, либо изменения их дисперсионных кривых при распространении по участкам с измененными свойствами. При неразрушающем контроле дефектных зон в стержнях и трубах, как правило, используют источники, возбуждающие гармонические волны Похгаммера – Кри. Это необходимо для возможности сопоставления теоретических дисперсионных кривых с полученными в ходе экспериментальных исследований.

В настоящей работе по дисперсионному уравнению осуществляется построение дисперсионных кривых для нижней (фундаментальной) аксиально симметричной моды волн Похгаммера – Кри, распространяющихся в цилиндрическом стержне.

Рассматривается два основных случая: (1) вариация коэффициента Пуассона и (2) вариация модуля упругости материала стержня, получены следующие результаты:

1. Вариация коэффициента Пуассона. Результат изменения относительного значения первой предельной скорости, при вариации коэффициента Пуассона показывает, что в области высоких частот фазовая скорость является информативной для определения коэффициента Пуассона материала.

2. Вариация модуля упругости. Обнаружено, что в окрестности второй предельной скорости исследуемые дисперсионные кривые являются информативными для определения модуля упругости материала.

## Вычисление коэффициента интенсивности деформации для осесимметричной задачи пластического течения трубы по жесткому волокну

Гандилян Д.В.[1,2], Идрисов Д.М.[1]
Научный руководитель — доцент, к.ф-м.н. Лямина Е.А.
[1]ИПМех РАН; [2]МВТУ, Москва
david.ghandilyan@mail.ru

Во многих процессах обработки металлов резанием и давлением вблизи поверхностей с высокими удельными силами трения формируется тонкий слой, микроструктура в котором значительно отличается от микроструктуры в основном объеме материала. Коэффициент интенсивности скорости деформации, введенный для жесткопластических моделей, является коэффициентом перед сингулярным членом при разложении эквивалентной скорости деформации вблизи поверхности максимального трения и, таким образом, контролирует величину эквивалентной скорости деформации. С другой стороны, эквивалентная скорость деформации определяет эволюцию структуры около поверхности контакта, что согласуется с экспериментальными данными, которые показывают, что узкий слой с измененной микроструктурой часто возникает вблизи поверхности трения в процессах обработки. Для использования коэффициента интенсивности деформации в описании поведения материала, необходимо разработать эффективный численный метод расчета коэффициента интенсивности деформации.

В [1, 2] предложены модели для описания развития ультрамелкозернистого слоя вблизи поверхности трения на основе коэффициента интенсивности деформации. Для применения

этих моделей, необходимо разработать точный метод расчета коэффициента интенсивности деформации. Современные коммерческие пакеты конечных элементов не могут быть применены для вычисления коэффициента интенсивности деформации, поскольку поле вблизи поверхности максимального трения является сингулярным для жесткопластических моделей.

Численный подход для расчета коэффициента интенсивности деформации, основанный на методе характеристик, предложен в [3]. Для случая осесимметричных течений, коэффициент интенсивности скорости деформации определен в [4]. Однако сравнение численного решения плоской деформации, полученного в [3], и соответствующее приближенное аналитическое решение для осесимметричной задачи демонстрирует, что точность аналитического решения недостаточна для практического применения. Поэтому необходим эффективный численный метод расчета коэффициента интенсивности деформации при осесимметричном течении. Для моделей, включающих критерий текучести Треска, такой метод может быть основан на методе характеристик и может рассматриваться как продолжение метода, разработанного в [3].

В настоящей работе, применен метод характеристик для осесимметричной задачи о пластическом течении трубы по жесткому волокну. Проведено сравнение численных и аналитических решений поля напряжений и скоростей. С помощью предложенного в [5] метода определен коэффициент интенсивности скорости деформации вблизи поверхности трения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-51-540003.

Литература

1. Goldstein R.V., Alexandrov S.E. (2015) An approach to prediction of microstructure formation near friction surfaces at large plastic strains, Phys. Mesomech., 18, 223-227.

2. Alexandrov S.E., Goldstein R.V. (2015) On constructing constitutive equations in metal thin layer near friction surfaces in material forming processes, Dokl. Phys., 60, 39-41.

3. Alexandrov S., Kuo C.-Y., Jeng Y.-R. (2015) A numerical method for determining the strain rate intensity factor under plane strain conditions, Cont. Mech. Therm., 28, 977-992.

4. Lyamina E., Nguyen T. (2016) Effect of the Yield Criterion on the Strain Rate and Plastic Work Rate Intensity Factors in Axisymmetric Flow, Struct. Eng. Mech. 58, 719-729.

5. Nguyen T., Nguyen K., Alexandrov S. (2017) A Numerical Solution for the Axisymmetric Flow of a Plastic Tube on a Rigid Fibre, J. Phys.: Conf. Ser. 885 012018.

## Молекулярно-динамический подход к анализу структуры межзеренных границ

Герасимов Р.М.
Научный руководитель — доцент, к.ф-м.н. Волегов П.С.
ПНИПУ, Пермь
romagrizly@gmail.com

Совершенствование технологий создания материалов, представляющих собой металлы и их сплавы, ставит в настоящее время множество новых вопросов, касающихся точного описания внутреннего строения этих материалов, а также способов анализа этого строения в процессе изготовления и при эксплуатации. Одной из наиболее важных проблем при создании моделей металлических материалов является описание структуры и свойств межзеренных границ, которые представляют собой переходную область между соседними зернами, кристаллические решетки которых имеют различную пространственную ориентацию по отношению друг к другу. Стоит отметить, что на сегодняшний день не существует единой теории, способной описать структуру и эволюцию структуры межзеренных границ в ходе какого-либо технологического процесса, что ставит под вопрос

применимость используемых моделей материалов, в особенности – основанных на физических теориях пластичности.

В ходе работы построена и численно реализована математическая модель, описывающая процесс формирования межзеренной границы между двумя соседними зернами поликристалла в ходе процесса двусторонней кристаллизации. Для построения модели использовался молекулярно-динамический подход, который, с одной стороны, не позволяет создавать модели реальных технологических процессов, однако хорошо подходит для теоретического исследования состояния и эволюции структуры исследуемого материала на уровне наномасштабов. Определяющим фактором при изучении свойств конкретного материала с использованием метода молекулярной динамики является выбор потенциала межатомного взаимодействия, который описывает энергию взаимодействия частиц (атомов) в зависимости от расстояния между ними, типов связи и т.д. Для металлов и сплавов на их основе в последнее время широко используются потенциалы, построенные с помощью модели погруженного атома (EAM – embedded atom model). Выбор EAM в работе обусловлен достаточно прозрачным с точки зрения физики алгоритмом построения, а также хорошим согласованием с результатами экспериментальных исследований.

Построенная в ходе работы модель была использована для проведения ряда численных экспериментов по описанию процесса двусторонней кристаллизации меди. В качестве начальной конфигурации рассматривались два соседних зерна, кристаллические решетки которых были разориентированны друг относительно друга, а также некоторая «прослойка» между ними, имеющая структуру расплава. Начальная температура системы (под которой в рамках работы понимается мера средней кинетической энергии атомов) была задана при помощи распределения Максвелла и составляла 1400 К. Кроме того, осуществлен поиск термодинамически устойчивой конфигурации системы атомов путем поддержания постоянной температуры (термостатирования). Отвод энергии в ходе расчета осуществлялся с уже кристаллизовавшейся части расчетной области. После завершения процесса кристаллизации полученные границы исследовались на устойчивость с помощью алгоритма имитации отжига. Полученные в ходе расчетов конфигурации межзеренных границ были исследованы с помощью различных методов структурного анализа, основанных на введении некоторой меры локального беспорядка вокруг каждой частицы (либо группы частиц). Показано, что использование таких методов, как параметр центральной симметрии (CSP – central symmetry parameter), анализ общего соседства (CNA – common neighborhood analysis) и др. позволяют достаточно точно выделить межзеренную границу, а также оценить ее структуру. Кроме того, была выполнена оценка потенциальной энергии границы в зависимости от угла разориентации кристаллических решеток соседних зерен, в том числе – для т.н. границ специального типа. Также в работе были исследованы механизмы образования и развития различных микроповреждений, возникающих в материале в процессе крис. Полученные результаты хорошо согласуются с известными экспериментальными данными как для случайных углов разориентации, так и для специальных разориентировок.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-1298.2017.1.

## Исследование фазовых переходов в цирконии методом молекулярной динамики

Гордеев И.С.
Научный руководитель — к.ф-м.н. Стариков С.В.
МФТИ, Долгопрудный
gordeevilu@gmail.com

Данная работа посвящена изучению границ переходов между различными фазами в цирконии. Были исследованы границы перехода между ГПУ- и ОЦК- фазами, а так же ОЦК-фазой и расплавом. Расчеты проводились на основании двух различных межатомных потенциалов EAM [1] и ADP [2]. Для проверки достоверности полученных результатов, точки переходов определялись различными методами, такими как однофазное моделирование с различными скоростями нагрева и охлаждения, двухфазное моделирование и расчет термодинамических параметров через фононные спектры. Метод однофазного моделирование с различными скоростями нагрева и охлаждения заключается в получении набора температур потери стабильности определенной фазы при различных скоростях, и последующей аппроксимации этих данных. Для метода двухфазного моделирования в расчетной ячейке создается две фазы, и далее по движению границы раздела фаз делается вывод о стабильности той или иной фазы. Расчет термодинамических параметров через фононные спектры основан на получении автокорреляционной функции для однофазных систем, находящихся в состоянии термодинамического равновесия, и расчета на основании этих данных фононных спектров, что позволяет вычислить свободную энергию.

Сопоставление результатов показывает, что расчет последним методом дает завышенные температуры переходов, что объясняется ангармонизмом циркония.

Литература

1. M.I. Mendelev and G.J. Ackland, “Development of an interatomic potential for the simulation of phase transformations in zirconium,” Phil. Mag. Lett., 87, 349-359 (2007)

2. Smirnova, D. E., and S. V. Starikov (2017), “An interatomic potential for simulation of Zr-Nb system, Computational Materials Science,” 129, 259-272

## Численное моделирование распространения ударной волны с использованием модели высокоскоростной пластической деформации металлов

Грачёва Н.А.
Научный руководитель — д.ф-м.н. Майер А.Е.
ЧелГУ, Челябинск
nagra45da@gmail.com

Для оценки механических свойств конструкционных материалов используют различные схемы нагружения. Особый интерес представляют высокоскоростные деформации, которые могут привести к разрушению инженерных сооружений, рассчитанных только на статические нагрузки. Математические модели поведения материала позволяют описать динамику деформируемого тела. В качестве эмпирической модели, описывающей высокоскоростную деформацию металлов, была выбрана модель Зерилли-Армстронга [1].

В данной работе моделировалось распространение ударной волны в металле. Моделирование основано на численном решений уравнений механики сплошной среды в лагранжевых переменных [2]. Предполагалось, что при пластическом течении напряжения остаются на пределе упругости, что соответствует идеально пластической среде [3]. При описании результатов анализировалось изменение параметров, характеризующих состояние

системы, для различных вариаций начальных условий. На следующем этапе работы считалось, что при пластическом течении напряжение непостоянно. Для перерасчета напряжения была использована модель Зерилли-Армстронга, основанная на положениях теории дислокаций. Подбор материальных констант, входящих в уравнение для металлов с ГЦК решеткой, программировался на основе испытательных данных, проводимых в широком диапазоне деформаций, скоростей деформаций и температур [4]. Модель учитывает размер зерна, термическое размягчение, деформационное упрочнение и скоростное деформационное упрочнение. С учетом вышесказанного моделировалось распространение ударной волны в металле. Проведен анализ полученных данных.

Программирование проводилось в интегрированной среде разработки Qt Creator. Код программы был написан на языке программирования C++.

Литература

1. Frank J. Zerilli and Ronald W. Armstrong, J. Appl. Phys. 61, 1816 (1987)
2. Яловец А.П. Расчет течений среды при воздействии интенсивных потоков заряженных частиц // ПМТФ, 1997, т. 38, № 1, 151-166
3. Уилкинс М. Л. Расчет упругопластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике / Под ред. Б. Олдера, С. Фернбаха, М. Ротенберга. М.: Мир, 1967.
4. J.D.Seidt, A.Gilat, IJSS. 50(10), 2013, p. 1781-1790

## Энергетическая модель эволюции усталостной трещины типа «рыбий глаз»

Гулин В.В., Ефремов В.А.
Научный руководитель — к.т.н. Никитин А.Д.
МАИ, Москва
kornet104@gmail.com

Непрерывное совершенствование двигателей различного назначения (авиационные, скоростные поезда, автомобили и т.д.) приводит к необходимости учета новых режимов нагружения, связанных с высокочастотными нагрузками малой амплитуды. Данный режим широко известен в литературе под названием сверхмногоцикловая усталость (СВМУ). Особенностью данного режима нагружения является возможность разрушения материала под действием напряжений существенно ниже классического предела усталости. При этом количество циклов нагружения до разрушения варьируется от 10 в 8 степени до 10 в 10 степени, что на порядки больше баз испытаний для определения усталостных характеристик материала. В СВМУ режиме нагружения зарождение усталостной трещины происходит из-под поверхности образца или изделия, что принципиально отличает этот режим от известных областей малоцикловой (МЦУ) и многоцикловой усталости (МНЦУ).

Зарождение усталостной трещины в СВМУ, как правило, связано с внутренним дефектом материала (включения, поры, литейные дефекты и т.д.). Оценка длительности стадий зарождения и роста трещины в этом случае показывает доминирующую роль процесса зарождения (до 99 % от общей долговечности Nf). Таким образом, на рост усталостной трещины приходится порядка 1 % от, Nf что позволяет определить проблему СВМУ, как проблему зарождения усталостных трещин.

Характерная поверхность излома при подповерхностном зарождении носит название «рыбий глаз» и имеет последовательность ярко выраженных областей: (1) дефект микроструктуры; (2) мелкозернистую область; (3) область с малой шероховатостью; (4) область с большой шероховатостью; (5) зона долома. Описание эволюции роста трещины в пределах каждой из зон является большой научной задачей.

В настоящей работе предлагается энергетическая модель эволюции усталостной трещины типа «рыбий глаз» в пределах области (2). На более поздних стадиях подповерхностная трещина может быть эффективно описана в рамках классической теории

разрушения. При описании эволюции трещины в мелкозернистой зоне предлагается выделить два этапа: (а) формирования дефектной структуры в виде тонкого слоя сферических частиц; (б) образование свободной поверхности по наиболее поврежденным поверхностям дефектной структуры. Каждый из процессов определен своей энергоемкостью, а доля подводимой энергии является функцией количества циклов. Результаты оценки становления дефектной структуры сравниваются с результатами усталостных испытаний в области СВМУ.

## Исследование эволюции внутренней структуры бикристалла при деформировании

Давлятшин Р.П.
Научный руководитель — доцент, к.ф-м.н. Волегов П.С.
ПНИПУ, Пермь
romadavly@gmail.com

Получение материалов с заранее известными физико-механическими характеристиками позволяет создавать конструкции и изделия с улучшенными свойствами, которые находят применение во многих отраслях промышленности. В свою очередь, характеристики металлов и сплавов напрямую зависят от плотности и взаимного расположения различного рода дефектов: дислокаций, дефектов упаковки, межфазных границ, границ зерен, микроповреждений и т.д. [1]. Однако, большинство существующих на сегодняшний день моделей материалов не учитывают взаимодействие дефектов кристаллической решетки. Таким образом, актуальным является исследование особенностей взаимодействия микро- и мезодефектов, а также изучение их эволюции в процессе деформирования.

Целью работы является разработка, численная реализация и исследование математической модели, описывающей процесс деформирования бикристалла с учетом дефектной структуры кристаллитов с применением метода молекулярной динамики, изучение взаимодействия дислокаций и границы зерен, а также изучение эволюции дислокационной структуры и структуры самой межзеренной границы. Для моделирования используется метод молекулярной динамики, причем взаимодействие между частицами задается с помощью потенциала погруженного атома (EAM) [2]. Применение EAM-потенциала обосновано тем, что в потенциалах такого типа учитывается взаимодействие атомов с электронными облаками и электронным газом, что является важным при моделировании структуры металлов и их сплавов. В качестве моделируемого материала была выбрана медь [3].

Изучение процесса взаимодействия межзеренной границы и дислокационной структуры проходило в два этапа. На первом этапе был сгенерирован бикристалл с устойчивой межзеренной границей [4] и углом разориентировки между кристаллитами 60 градусов. Далее в структуру кристаллической решетки были внесены дислокации; для этого в плоскости наиплотнейшей упаковки были удалены атомы, принадлежащие этой плоскости и содержащиеся в окружности некоторого радиуса, причем получающиеся «полости» были равномерно распределены внутри каждого кристаллита, после чего система была отрелаксированна при постоянной температуре. На втором этапе проведено моделирование процесса деформации простого сдвига бикристалла с шагом интегрирования 1 фс. Для этого в системе выделялись две «жесткие» области, расположенные по краям моделируемой области. Одна из этих областей была зафиксирована, а атомам, принадлежащим второй области, придавалась некоторая постоянная скорость. Чтобы добиться скорости деформации, соответствующей квазистатическому деформированию, через каждые 1000 шагов интегрирования проводилась минимизация энергии системы методом имитации отжига. Процесс заканчивался при достижении конечной деформации в 4%. Анализ

эволюции дислокационной и межзеренной структуры был произведен с использованием алгоритма определения дислокаций (dislocation extraction algorithm, DXA) [5], а также параметра центральной симметрии (central symmetry parameter, CSP) [6]. Имитированы взаимодействия дислокаций и межзеренной границы, в том числе получены зависимости параметров, описывающих внутреннюю структуру бикристалла от плотности дислокаций.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-1298.2017.1.

Литература

1. Орлов А.Н., Перевезенцев В.Н., Рыбин В.В. Границы зерен в металлах/под ред. Бернштейна М.Л., Новикова И.И. – Москва: Металлургия, 1980. – 153 с.

2. Daw M. S., Baskes M. I. Embedded-atom method: Derivation and application to impurities, surfaces, and other defects in metals // Physical Review B. – 1984. – Vol. 29, No. 12. – pp. 6443-6453.

3. Mishin Y., Mehl M.J., Papaconstantopoulos D.A., Voter A.F., Kress J.D. Structural stability and lattice defects in copper: Ab initio, tight-binding and embedded atom method calculations // Physical Review B. – 2001. – V. 63, No. 22. – 224106. doi: 10.1103/PhysRevB.63.224106

4. Volegov P.S., Gerasimov R.M. Modeling the formation of grain boundaries as a result of two-sided crystallization using molecular dynamics // Key Engineering Materials. – 2017. – V. 743. – pp. 181-186.

5. Stukowski A., Bulatov V. V., Arsenlis A. Automated identification and indexing of dislocations in crystal interfaces // Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. – 2012. – Vol. 20, No. 8. – 085007. DOI: 10.1088/0965-0393/20/8/085007

6. Cynthia L. Kelchner, S. J. Plimpton, J. C. Hamilton, Dislocation nucleation and defect structure during surface indentation // Physical Review B. – 1998. – Vol. 56, Is. 17. – pp. 11085 – 11088.

## Моделирование связанных термоупругодиффузионных процессов при разработке новых материалов

Давыдов С.А., Федорова А.Д.
Научный руководитель — доцент, к.ф-м.н. Земсков А.В.
МАИ, Москва
xenon_93@inbox.ru

Создание новых материалов с исключительными свойствами и разработка технологий для их получения требуют не только передовой экспериментальной базы, но и точных математических моделей, описывающих сложные физические процессы. Одним из способов модификации и уточнения моделей современных и перспективных технологических процессов является учёт таких явлений как связанность различных взаимодействующих между собой полей. Примером такой связанности может являться модель термоупругой диффузии, в которой рассматривается взаимодействие механических, тепловых и диффузионных полей.

При моделировании высокоинтенсивных технологических процессов необходимо принять во внимание тот факт, что реализация большинства из них сопровождается значительными деформациями, мощными тепловыми потоками, высокими скоростями нагрева и переноса массы на поверхности материала. В таком случае возникает необходимость не только в учёте связанности, но и в рассмотрении конечных скоростей распространения тепла и вещества в исследуемой среде. Введение ненулевых времён релаксации и учёт связанности полей позволяет создать более точную и устойчивую математическую модель для описания такого рода технологических процессов как ионная

имплантация, диффузионная пайка, термоводородная обработка, наращивание плёнок на различных подкладках и т.д.

В работе рассматривается одномерная нестационарная задача термоупругой диффузии для однородной многокомпонентной среды с плоскими границами при учёте ненулевых времён релаксации. Физико-механические процессы в среде описываются локально-равновесной моделью связанной термоупругой диффузии, включающей уравнения движения упругой среды, теплопереноса и массопереноса. Граничные условия представляют собой заданные механические нагрузки, тепловые и диффузионные потоки на плоских границах слоя или полупространства. Начальные условия полагаются нулевыми.

Решение задачи ищется в интегральной форме, которая представляет собой свёртку по времени функций Грина с правыми частями граничных условий. Для нахождения функций Грина используются преобразование Лапласа по времени и, в случае слоя, разложение искомых функций в тригонометрические ряды Фурье по координате. Для полупространства разложение в ряды Фурье заменяется синус- и косинус-преобразованием. В результате трансформанты искомых функций выражаются как рациональные дроби относительно параметра преобразования Лапласа, а их оригиналы находятся с помощью известных теорем и таблиц операционного исчисления. Проведён анализ полученных функций Грина с учётом выделенных в них особенностей. Выполнен тестовый расчёт.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 17-08-00663 А).

## Исследование механических свойств углепластика при статическом и высокоскоростном нагружении

Добрянский В.Н.
Научный руководитель — к.ф-м.н. Соляев Ю.О.
МАИ, Москва
aprilvasya@gmail.com

Исследуется композиционный материал на основе модифицированной эпоксидной матрицы с повышенными деформационными характеристиками, армированной углеродными волокнами. Представлены результаты статических испытаний на растяжение и сжатие образцов с различной схемой армирования. По результатам испытаний идентифицированы механические свойства однонаправленных слоев (монослоев) с использованием классической модели слоистых композитов. Полученные данные сопоставлены с результатами расчетов в рамках микромеханического подхода, реализованного с использованием модели цилиндрического включения, метода Мори-Танака и различных критериев прочности. Продемонстрировано отличие прогнозов, получаемых в рамках микро- и макромеханического подходов для эффективных свойств монослоя.

Также представлены результаты высокоскоростных испытаний исследуемых композитов на сжатие. Установлено значительное снижение прочностных свойств композиционного материала при повышенных скоростях деформаций. При этом по результатам испытаний установлено, что свойства материала матрицы незначительно изменяются при действии высокоскоростного нагружения. Установлено изменение характера разрушения образцов. При высокоскоростных испытаниях в образце появлялись трещины, расположенные параллельно действующей нагрузке. В статических же испытаниях образец разрушался полностью.

Представлены результаты томографических исследований микроструктуры композитов, проведенных до и после проведения испытаний. Показана возможность возникновения внутренних дефектов в виде расслоений в образцах, выдержавших высокоскоростные испытания без разрушения.

## Математика архитектуры однополостного гиперболоида в аддитивных технологиях

Жигалова А.И.
Научный руководитель — доцент, д.т.н. Лебедев В.В.
МГТУ им. Н.Э.Баумана, Мытищинский филиал, Мытищи
aelita99@list.ru

Цель работы заключается:

1) в математическом предложении технического и архитектурного решения высотного сооружения как продолжения развития математических идей В.Г.Шухова;

2) в снятии ряда технологических ограничений для перспективных конструкций;

3) в сочетании математических принципов с гармонической архитектурой.

Классическим примером технической реализации однополостного гиперболоида «старыми» технологиями служит Шаболовская телебашня конструкции В.Г.Шухова [1,2]. Форма башни выбрана конструктором по нескольким причинам.

1. Однополостный гиперболоид имеет прямолинейные образующие [3].
2. Верхняя часть каждой секции – это «горлышко» однополосного гиперболоида.
3. Высоты первых секций приблизительно одинаковые.
4. Стержни нагружены почти одинаково в каждой точке, получилась почти равнопрочная более лёгкая конструкция.
5. Масса конструкции уменьшилась в 4 раза по сравнению с Эйфелевой башней.

Конструкции В.Г.Шухова были созданы сто лет назад, когда не было возможности реализовать более рациональные технические решения. Сейчас очень быстро развиваются аддитивные 3D-технологии. Появляется возможность изготовить конструкции в виде сложных оболочек, о которых В.Г.Шухов не мог даже мечтать с технологической точки зрения [4,5]. На основе современных аддитивных технологий можно снять первое ограничение – изготовить не круговой, а эллиптический однополостный гиперболоид. Ориентация большой оси эллипса по розе ветров позволит снизить ветровые нагрузки и облегчить конструкцию. Второе ограничение, которое предлагается снять с перспективных проектов математически, - это отказ от «горлышка» однополостного гиперболоида в верхних основаниях секций. В.Г.Шухов не мог расширить конструкцию секций в верхней части, потому что через «горлышко» проходил подъём вышележащих секций, они просто не прошли бы внизу в самом узком месте. Главное направление работы заключается в переходе от конечного числа прямолинейных образующих в сооружениях В.Г.Шухова к несчётному множеству образующих, то есть к оболочкам. Такой переход стал возможен в настоящее время благодаря развитию аддитивных технологий и возможностью реализации с их помощью сложных математических объектов.

Однополостный гиперболоид был изучен на предмет возможности соблюдения правил «золотого» сечения при архитектурном проектировании. На защиту выносится три положения. Во-первых, математическое доказательство возможности соблюдения четырёх независимых соотношений «золотого» сечения гиперболических секций высотной конструкции. Во-вторых, следствие пятого «золотого» соотношения из сформулированных четырёх принципов. В-третьих, невозможность соблюсти шестое «золотое» сечение по «горлышку» гиперболоида, но возможность выполнить его приближённо с относительной ошибкой не более 13%.

Для доказательства правильности математических расчётов сформулировано Техническое задание и выдан заказ на изготовление аддитивными технологиями двух комплектов макетов перспективной высотной башни. Техническое задание иллюстрировано программными средствами MathCAD-13. Заказ был принят специализированной фирмой для изготовления с доработкой Технического задания по необходимому для 3D-принтера программному обеспечению. Сертификаты получены. Реализация гармонического «золотого» сечения приводит к убыванию размеров секций по геометрической прогрессии. Это определяет предельную высоту башни.

Пример реализации технологии аддитивных технологий для создания модели высотной башни сложной формы на основе нескольких однополостных гиперболоидов с максимальным соблюдением «золотого» сечения выполнен на модели, изготовленной на 3D-принтере.

Продолжение работы планируется в области создания новых материалов, в том числе композиционных, на основе хорошей несущей способности и прочностных характеристик однополостного гиперболоида.

Литература

1. Андреев Н.Н. и др. Ажурная башня / Математические этюды. – Электронный ресурс: http://www.etudes.ru/ru/etudes/shukhov/

2. Шуховские башни // Математическая составляющая / Ред.-сост. Н.Н.Андреев, С.П.Коновалов, Н.М.Панюнин. – М.: Математические этюды, 2015. – С.60-61. – Электронный ресурс: http://book.etudes.ru/toc/shuhov/

3. Привалов И.И. Аналитическая геометрия. Учебник для вузов. – Изд. Юрайт, 2016.

4. Жигалова А.И. Гармоническая математика однополостного гиперболоида. – Электронный ресурс (видеоролик 8 минут): https://youtu.be/XD29txJO0gE

5. Жигалова А.И. 3D-моделирование в конкурсных проектных работах школьного кружка // Материалы XXVIII Международной конференции "Современные информационные технологии в образовании". Научно-методическое издание / Редакционная группа: Алексеев М.Ю. и др. - Троицк-Москва, 27 июня 2017 г. - ISBN 978-5-9907219-4-4 - Электронный ресурс: http://ito.bytic.ru/uploads/files/conf_2017.pdf - С.373-374.

## Оценка предельного состояния металла с помощью энергетического аналога эквивалентного воздействия

Загаровский А.А.
Научный руководитель — профессор, д.ф-м.н. Беклемишев Н.Н.
МАИ, Москва
zagarovskiy93@mail.ru

Развитие методов физической мезомеханики позволило предложить метод описания предельного состояния материала через универсальную характеристику – предельную плотность энергии деформации. Этот подход реализуется через введение эквивалентного напряжения [1], не зависящего от вида внешнего воздействия. Такой подход основан на современном понимании механизмов развития дефектной структуры как совокупности самоорганизованных и самосогласованных процессов, протекающих сразу на нескольких масштабных уровнях [2-4]. Современные исследования рассматривают возможность непосредственного перехода от напряжений к плотности энергии деформации, при этом напряжение всегда выступает как усредненная по некоторому объему величина. Фактически, этот подход расширяет возможности использования классического описания свойств материала. Это становится возможным благодаря физически обоснованному переходу между механикой сплошной среды и физикой кристаллической структуры.

В представленной работе рассматривается возможность применения энергетического эквивалента предельного напряжения в нормальных условиях опыта для различных видов внешнего воздействия. В частности, делается оценка размера зоны локальной деформации, наблюдаемой при сверхмногоцикловом нагружении сплава ВТ3-1. Делается вывод об определяющем значении локализации напряжений при этом виде воздействия. Формулируется вид энергетического критерия разрушения, основанного на принципе накопления повреждений, применимого для макро- и мезомасштабного уровней описания.

Выдвигается гипотеза, что плотность энергии, соответствующая предельному напряжению, является предельной характеристикой для материала и в случае воздействия ионизирующего излучения. На основе этого предположения делается оценка радиуса деформированной области вокруг трека иона золота с энергией 1 ГэВ в сплаве ВТ3-1.

Таким образом, устанавливается связь между силовыми и энергетическими характеристиками материала с учетом детального рассмотрения механизмов эволюции дефектной структуры при конкретном внешнем воздействии. Представлено единообразное описание самоорганизованного и самосогласованного развития дефектной структуры на различных масштабных уровнях и показано, что понятие эквивалентного напряжения может быть расширено на случаи разрушающего воздействия различной природы, например, ионизирующего излучения.

Литература

1. Шанявский А.А. Эквивалентное напряжение одноосного циклического растяжения как энергетическая характеристика усталости металла в условиях многопараметрического нагружения // Физ. мезомех. - 2017. - Т. 20. - № 4. - С. 33-42

2. Панин В.Е. Синергетические принципы физической мезомеханики. Физическая мезомеханика, Т. 3, № 6. 2000. С. 5-36.

3. Иванова В.С. Синергетика. Прочность и разрушение металлических материалов. Москва: Наука, 1992. 289 с.

4. Шанявский А.А. Моделирование усталостных разрушений металлов. Синергетика в авиации. Уфа: Монография. 2007. 495 с.

## Взаимодействие однородной консольно-закрепленной пластины с плоской гармонической звуковой волной

Иванов С.И.

Научный руководитель — доцент, к.т.н. Локтева Н.А.

МАИ, Факультет №9, Кафедра 902

Stanis-ivanov@yandex.ru

В настоящее время человек обитает в достаточно агрессивной окружающей среде, где одним из вредных факторов, воздействующих на организм, является повышенный шумовой фон. Одной из актуальных задач с точки зрения практики является организация эффективной звукоизоляции. Наиболее широко в данной области используются пластины, выполненные из однородного материала, которые наиболее просты в изготовлении и экономически оправданны.

В данной работе исследуются взаимодействие плоской гармонической волны с консольно-закрепленной однородной пластиной, что является упрощенной моделью звукозащитных экранов, широко используемых для ограждения жилых массивов от шума магистралей. Результатом решения данной задачи, является возможность определить амплитуды давлений прошедшей и отраженной волны, а также параметр звукоизоляции преграды.

Основной целью является вычисление коэффициента звукопоглощения преграды как функции частоты и пространственных координат. Рассматривается плоская постановка

задачи. Математическая модель включает в себя задание давления, уравнения движения для пластины и акустической среды, краевые условия для пластины, условия на бесконечности, а также условия контакта акустической среды с препятствием и неподвижной полуплоскостью.

В результате поставленная задача решается с помощью определения функций влияния для пластины и рассмотрения совместного решения уравнений колебаний пластины и акустической среды. Для чего было составлено уравнение движение пластины с учетом гармоничности всех входящих в нее функций, определены константы и функции влияния для нормальных перемещений [1].

Далее была рассмотрена граничащая с пластиной четверть плоскости, заполненная акустической жидкостью. Движение среды задавалось с помощью волнового уравнения Гельмгольца в потенциалах[2], что позволило установить взаимосвязь кинематических параметров пластины с амплитудой давления волны в среде с учетом конфигурации пространства. В результате совместного решения уравнения движения пластины и движения среды было получено интегро-дифференциальное уравнение, которое решалось методом последовательных приближений.

В результате полученных значений перемещений, после выполнения нескольких последовательных приближений, и на основании соотношений потенциала скорости, амплитуд давлений в прошедшей и отраженной волнах, можно определить коэффициент звукопоглощения и показатель звукоизоляции.

В данной работе приведен метод решения связанной задачи о взаимодействие плоской гармонической волны и консольно-закреплённой пластины. Полученные результаты зависят от материала, из которого выполнена пластина и ее геометрических параметров. Таким образом, становится возможным выбирать оптимальные параметры материала, из которого выполнена пластина, и ее геометрию, что представляет существенный практический интерес.

Литература

1. Горшков А.Г., Медведский А.Л., Рабинский Л.Н., Тарлаковский Д.В. Волны в сплошных средах. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 472 с.

2. Полянин А.Д. Справочник по линейным уравнениям математической физики. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 576 с.

## Анализ откольного разрушения в волновом поле Клейна-Гордона

Игушева Л.А.
Научный руководитель — член-корреспондент, д.ф-м.н. Петров Ю.В.
СПбГУ, Санкт_Петербург
st040152@student.spbu.ru

В данной работе рассматривается модель взаимодействия элементов инженерных конструкций с упругой окружающей средой. А именно, рассмотрено распространение перемещений и напряжений, возникающих в стержне постоянного поперечного сечения, при динамической нагрузке. Со стороны среды на стержень действуют силы сопротивления прямо пропорциональные перемещению.

Такая модель может быть применима во многих областях. Например, в настоящее время является актуальным изучение нанокомпозитов с включениями в виде волокон. Благодаря связи между матрицей полимера и включениями, такие нанокомпозиты обладают удивительными механическими характеристиками, в частности высоким пределом прочности и большим значением модуля Юнга. Современные наноматериалы являются перспективными в авиастроении. Например, они обладают антистатическими свойствами и могут защищать самолет от ударов молний. В макромире одним из примеров является

установка свай в строительстве. При этом очень важно знать какие напряжения и перемещения возникают в свае, так как это позволит рассчитать нагрузки, которые сможет выдержать конструкция.

В результате проделанной работы получено уравнение продольных колебаний стержня, взаимодействующего с упругой средой, которое оказывается известным уравнением Клейна-Гордона. Найдено решение этого уравнения, вычислены перемещения и напряжения, возникающие в стержне при динамическом нагружении. Затем рассмотрены распространение и отражение волны от свободной границы стержня конечной длины.

Рассмотрено несколько частных случаев, как распространяются волны в зависимости от нагружающей силы. Более того, найдена зависимость поведения стержня от частоты возмущающей нагрузки. При больших значениях частоты мы можем наблюдать колебания стержня, при маленьких – волны стремительно гаснут. Построены соответствующие графики напряжений и перемещений от координаты поперечного сечения.

В задаче отражения волны от свободного конца стержня показана возможность эффекта откольного разрушения. Обнаружено, что при небольших значениях коэффициента сопротивления среды и достаточно больших значениях частоты возмущающей силы напряжение в стержне может достигать больших значений по сравнению с исходной нагрузкой. Именно в этих условиях вероятность разрушения стержня в результате интерференции прямой и отраженной волн очень велика. Отмечены особенности, отличающие данный процесс от классического случая.

Для предсказания условий инициирования хрупкого разрушения стержня при отколе под действием приложенной динамической ударной нагрузки применен критерий инкубационного времени разрушения. В нескольких частных случаях найдены пороговые значения амплитуды возмущающей силы, при которых происходит разрушения стержня.

Литература

1. Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела //Наука, 1988, с. 187-190;

2. Petrov Y.V. Structural-temporal approach to modeling of fracture dynamics in brittle media// Rock Dynamics and Applications - State of the Art /Eds Jian Zhao, Jianchun Li/. 2013. CRC Press, Taylor \& Francis Group, London, 101-110;

3. Сироткин О. С., Андрюнина М. А. Перспективы применения нанокомпозитов в авиации //Авиационная промышленность № 2 – 2013, с 53-55.

## Численное моделирование процесса осадки трехслойной жесткопластической полосы между параллельными плитами при различных режимах трения

Идрисов Д.М.
Научный руководитель — доцент, к.ф-м.н. Лямина Е.А.
ИПМех РАН, Москва; МФТИ, Долгопрудный
idrisov.dim@mail.ru

Интенсивная пластическая деформация, возникающая вблизи поверхностей трения из-за сингулярного поля скоростей, оказывает влияние на образование ультрамелкозернистых слоев вблизи этих поверхностей [1], такие материалы чрезвычайно перспективны для применения в качестве конструкционных материалов в области авиастроения, космической техники, судостроения. Из анализа экспериментальных работ известно, что слои с измененной структурой возникают в различных процессах деформирования вблизи контакта материалов.

Задача о плоском течении жесткопластической полосы при сжатии между параллельными шероховатыми плитами является одной из классических задач теории пластичности (задача Прандтля о сжатии полосы). Решение для однородной идеально

жесткопластической полосы представлено в [2], для идеально жесткопластической упрочняющейся полосы в [3,4] и для многослойной полосы в [5,6].

В работе [7] получено решение для процесса осадки полосы, состоящей из двух слоев идеально жесткопластического материала, примыкающих к плитам, и внутреннего жесткопластического упрочняющегося слоя. При этом принимается достаточно общий закон изотропного упрочнения.

В данной работе получены и проанализированы численные результаты, демонстрирующие поле напряжений и скоростей, а так же построен график накопленной деформации в зависимости от толщины внутреннего слоя, для процесса осадки трехслойной полосы между параллельными шероховатыми плитами при условии проскальзывания и прилипания на поверхности контакта слоев. Внутренний слой полосы предполагается жесткопластическим и упрочняющимся по закону Свифта, два внешних слоя предполагаются идеально жесткопластическими.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-08-01063.

Литература

1. Griffiths B.J. Mechanisms of white layer generation with reference to machining and deformation processes // Trans. AMSE J. Trib. 1987. V. 109. P. 525–530.

2. Хилл Р. Математическая теория пластичности. М.: Гостехиздат, 1956. 407 с.

3. Дудукаленко В.В., Ивлев Д.Д. О сжатии полосы из упрочняющегося пластического материала жесткими шероховатыми плитами // Докл. АН СССР. 1963. Т. 153. № 5. С. 1024–1026.

4. Быковцев Г.И. О сжатии анизотропно упрочняющегося пластического слоя шероховатыми плитами // Докл. АН СССР. 1964. Т. 157. № 1. С. 66–68.

5. Alexandrov S., Mishuris G., Miszuris W. An analysis of the plane-strain compression of a three layer strip // Arch. Appl. Mech. 2001. V. 71. № 8. P. 555–566.

6. Alexandrov S., Tzou G.&Y., Huang M.&N. Plane strain compression of rigid/perfectly plastic multi-layer strip between parallel platens // Acta Mech. 2006. V. 184. № 1–4. P. 103–120.

7. Александров С., Гольдштейн Р. Исследование процесса осадки трехслойной жесткопластической полосы между параллельными плитами // Механика твердого тела. 2014. № 6. С. 120-131.

## Вычисление коэффициентов матрицы упругой заделки для задачи об отслоении тонкой полосы от полуплоскости

Каспарова Е.А.
Научный руководитель — доцент, д.ф-м.н. Устинов К.Б.
ИПМех РАН, Москва
korserpentis@mail.ru

Изучение механических свойств систем «покрытие-подложка» представляет большой теоретический и практический интерес в связи с тем, что подобного рода системы довольно часто встречаются как типичные элементы конструкции микроэлектронных и микромеханических устройств, биологических структур.

В процессе эксплуатации в таких системах могут возникать остаточные сжимающие напряжения, обусловленные, к примеру, отличием температурных коэффициентов линейного расширения подложки и покрытия, которые могут приводить к нарушению адгезионной прочности на границе раздела и, как следствие, отслоению покрытия. При этом основания отслоившихся участков покрытия могут принимать различные формы [1].

Моделирование отслоения покрытия для двухмерного случая, как правило, выполняют с помощью балочного приближения. При этом, отслоившийся участок покрытия, не контактирующий с основанием, рассматривается отдельно и моделируется с использованием

нелинейной теории пластин Кармана, а решение задачи об основании и покрытии (без отслоившегося участка) получают с помощью интегральных уравнений. Затем оба решения сшивают по краям пластины исходя и требования непрерывности перемещений [2].

В качестве эффективных граничных условий для первой задачи выбирают главный момент и главный вектор действующих в заделке усилий, причем в работе [3] было показано, что в общем случае необходимо учитывать все компоненты главного вектора усилий, которые совместно с главным моментом оказывают влияние на значения компонент вектора перемещения и поворота точки упругой заделки отслоившегося участка покрытия, не контактирующего с основанием. В соответствии со сказанным, в работе [3] была рассмотрена расширенная матрица коэффициентов упругой заделки.

В настоящей работе с помощью метода конечных элементов выполнены расчеты элементов расширенной матрицы коэффициентов упругой заделки. Для этого в программном комплексе Abaqus для случая плоской деформации было выполнено моделирование задачи о тонкой полосе, контактирующей с основанием из другого материала вдоль части своей границы, причем в качестве нагрузки поочередно задавался момент, растягивающая и перерезывающая силы. Выполнено исследование влияния отношения упругих модулей основания и покрытия, а также длины свободной границы полосы на значения коэффициентов упругой заделки.

Литература

1. Hutchinson J.W., Suo Z. Mixed mode cracking in layered materials // Adv. Appl. Mech. – 1991. – Vol. 29. – P. 147-167.

2. Yu H.-H., Hutchinson J.W. Influence of substrate compliance on buckling delamination of thin films // Int. J. Fract. – 2002. – Vol.113. – P. 39-55.

3. Устинов К.Б. Еще раз к задаче о полуплоскости, ослабленной полубесконечной трещиной, параллельной границе // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2013. – №4. – С. 138-168.

## Исследование влияния частиц SiC на напряженно-деформированное состояние алюминиевого сплава АК12 методами конечно-элементного моделирования и силовой зондовой микроскопии

Климова Т. Ю., Ледяев М. Е., Чаплыгин К. К.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Воронин С. В.
СНИУ им. С.П. Королёва, Самара
klimova.ssau@mail.ru

Технология получения композиционного материала определяет характер распределения фаз, от которого зависят свойства материала. Традиционно для определения свойств разрабатываемого материала создают множество опытных образцов и проводят большое количество испытаний. Целесообразно определять механические характеристики материала не на реальных образцах, а используя методики компьютерного моделирования, основанные на методе конечных элементов. Конечно-элементная модель композита АК12+0,06%SiC позволяет оценить поведение материала в процессе деформирования, определить напряженное состояние и механические свойства получаемого материала. Поэтому целью данного исследования является разработка конечно-элементной модели композиционного алюмоматричного материала АК12+0,06%SiC с учетом структурных составляющих.

Выявление мелкодисперсных включение частиц карбида кремния осуществлялось методом наноиндентирования при помощи сканирующего нанотвердомера «НаноСкан-3D». Первоначально шлифованный на фетровом круге образец композиционного материала АК12+0,06%SiC методом электролитической полировки вытравливался до выявления микроструктуры. Образец помещался на предметный столик сканирующего нанотвердомера «НаноСкан-3D». После этого производилось сканирование поверхности образца со

скоростью 15 мкм/сек и с шагом 1 мкм. При помощи сканирования была получена карта профиля поверхности исследуемого образца.

Далее производилось измерение модуля упругости каждой фазы на исследуемом участке. Измерение происходило методом снятия кривых подвода индентора к поверхности образца. В каждую фазу производилась серия подводов. Количество подводов определялось размером фазы. В ходе измерения было установлено, что модуль упругости для α-твердого раствора составлял 63-79 ГПа, а для эвтектики 80-91 ГПа. Однако, в зоне эвтектической фазы встречались значения модуля упругости намного выше, равные 380-410 ГПа. Предполагается, что это включения карбида кремния, которые невозможно было обнаружить визуально.

Для проверки полученных результатов, эксперимент был повторно проведен на образце сплава АЛ2, обладающим аналогичным химическим и фазовым составом АК12, но в который частицы карбида кремния не вводились. Так же исследование сплава АЛ2 позволяло проверить достоверность данных по модулям упругости, полученным для фаз в композиционном материале АК12+0,06%SiC.

Для выявления структуры образец сплава АЛ2 подготавливался, при тех же режимах электролитического травления, что и композиционный материал АК12+0,06%SiC. Сканирование производилось на аналогичной скорости и шаге, что и для образца композиционного материала.

В ходе измерения модуля упругости фаз образца сплава АЛ2 было установлено, что значения модуля упругости α-твердого раствора сплава АЛ2 составляет 64-79 ГПа, для эвтектики 81-90 ГПа. Для эвтектики, находящейся в узком пространстве между дендридами α-твердого раствора значения модуля упругости составляет 110-147 ГПа. Это связано с тем, что в данных местах находятся иглы нерастворенного кремния.

Конечно-элементная модель материала строилась в двухмерной постановке. Первым этапом для построения конечно-элементной модели образца композита АК12+0,06%SiC являлось получение растрового изображения микроструктуры материала с помощью сканирующего нанотвердомера «НаноСкан-3D». Дальнейшая обработка изображения микроструктуры исследуемого материала выполнялась с помощью графических редакторов. При помощи конвертеров переводилось растровое изображение микроструктуры исследуемого материала в векторное. Таким образом четкие границы фаз конвертировались в геометрические векторные линии. После применения конвертера, полученное векторное изображение микроструктуры исследуемого материала импортировалось в программу конечно-элементного анализа MSC.Marc. В процессе разбиения векторного изображения микроструктуры на конечные элементы задавались границы разбиения и механические свойства фаз.

Растяжение является наиболее распространенным видом деформации. Процесс деформации конечно-элементной модели материала АК12+0,06%SiC изучался при растяжении в пластической области. К конечно-элементной модели исследуемого материала прикладывались одноосные растягивающие усилия, вызывающие напряжения величиной 150 МПа – для исследования процессов, происходящих при пластических деформациях.

В результате проведенного конечно-элементного анализа была получена эпюра распределения напряжений и деформаций. При анализе эпюры напряженно-деформированного состояния конечно-элементной модели материала выявлены поля повышенных напряжений, обусловленные скоплением упрочняющих фаз карбида кремния. Это позволяет сделать предположение, что данные зоны являются возможными очагами зарождения трещины и разрушения материала.

## Экстремальные значения основных упругих характеристик для гексагональных кристаллов

Комарова М.А.
Научный руководитель — к.ф-м.н. Лисовенко Д.С.
ИПМех РАН, Москва
mk.komarova@mail.ru

В современном материаловедении активно стали использовать наноматериалы, которые изготовлены из анизотропных монокристаллов. Упругие характеристики (модуль Юнга, коэффициент Пуассона и модуль сдвига) анизотропных материалов зависят от ориентации испытываемых образцов. В работе исследована изменчивость модуля Юнга, коэффициента Пуассона и модуля сдвига для гексагональных кристаллов. Получены выражения для трех экстремальных значений модуля Юнга и модуля сдвига, восьми стационарных значений коэффициента Пуассона, а также условия, при которых данные значения будут являться максимумами или минимумами. На основе экспериментальных данных из справочника Ландолта-Бернстайна дан численный анализ экстремумов упругих характеристик для 143 гексагональных кристаллов. Проведенный анализ показал, что у 27 гексагональных кристаллов отсутствует одно из экстремальных значений, т.е. у этих кристаллов имеется только два экстремальных значения. Выявлено, что наибольшая разница между максимальным и минимальным значением модуля Юнга и модуля сдвига обнаруживается у слоистого кристалла - графита. Предложены классификационные схемы для экстремальных значений модуля Юнга, модуля сдвига и трех стационарных значений коэффициента Пуассона гексагональных кристаллов в зависимости от безразмерных параметров. На классификационной схеме выделено шесть зон с различными неравенствами между экстремальными значениями модуля Юнга и восемь зон для экстремальных значений модуля сдвига. Квалификационная схема для трех стационарных значений коэффициента Пуассона разделена на шесть с различными неравенствами между стационарными значениями.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-01-00325 и Программы фундаментальных исследований Президиума РАН I.2.32.

## Образование призматической дислокационной петли несоответствия в композитной декаэдрической наночастице

Кравченко М.Ю., Красницкий С.А.
Научный руководитель — профессор, д.ф-м.н. Гуткин М.Ю.
Университет ИТМО, Санкт-Петербург
maryia.krauchanka@gmail.com

Металлические наночастицы находят различное применение в авиации, биомедицине, сенсорных устройствах, фотонике и плазмонике. Среди металлических наночастиц, имеющих гранецентрированную кубическую кристаллическую решетку, выделяют особый класс частиц с осями симметрии пятого порядка, возникающими в результате пятикратного циклического двойникования [1-3]. Речь идет о так называемых «многократно-двойникованных» или «пентагональных» наночастицах. Декаэдрические наночастицы, простейшие из них, имеют одну ось симметрии пятого порядка. Большое внимание привлекают, в частности, декаэрические композитные наночастицы типа «ядро-оболочка» [4], из-за своей высокой каталитической активности. В таких композитных наночастицах формируются высокие остаточные механические напряжения, вызванные упругими деформациями, характерными для пентагональных частиц, и несоответвием решеток материалов ядра и оболочки, что приводит к значительной запасенной упругой энергии этих

наночастиц. По мере роста такой частицы ее упругая энергия быстро возрастает пропорционально ее объему и при некоторых условиях может релаксировать за счет образования различных дефектов решетки, поля напряжений которых частично компенсируют имеющиеся в наночастице остаточные напряжения. На данный момент не существует аналитического описания механизмов релаксации рассматриваемых наночастиц, однако известно об экспериментальных наблюдениях дефектных структур, возникающих в результате таких релаксационных процессов [5].

В настоящей работе теоретически анализируется релаксация напряжений в декаэдрической композитной наночастице типа «ядро-оболочка» путем образования круговой призматической дислокационной петли несоответствия (ПДПН). Начальное напряженное состояние представлено в виде суперпозиции упругих полей аксиально расположенной в наночастице положительной клиновой дисклинации мощностью 7°20' [6] и упругих полей, обусловленных несоответствием решеток материалов ядра и оболочки. При таком подходе задача представляет собой комбинацию уже решенных задач для зарождения подобных дислокационных петель в монокристаллических наночастицах типа «ядро-оболочка» [7] и в однородных декаэдрических наночастицах [8]. Используя этот подход, мы проанализировали изменение полной энергии в декаэдрической композитной наночастице типа «ядро-оболочка», сопровождающее образование ПДПН на границе ядра и оболочки в приближении равных и изотропных модулей упругости их материалов. Было определено такое критическое значение параметра решеточного несоответствия, при превышении которого появление ПДПН становится энергетически выгодным. При заданной величине параметра несоответствия, превышающей это критическое значение, можно определить два критических значения приведенного радиуса ядра наночастицы, в пределах которых зарождение ПДПН энергетически выгодно. Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными для декаэдрических композитных наночастиц, состоящих из платиновых ядер и палладиевых оболочек [4]. При варьировании таких параметров материала, как энергия дислокационного ядра и коэффициент Пуассона, можно достичь как большей, так и меньшей устойчивости рассматриваемых частиц к зарождению ПДПН. Во всех этих случаях при заданном значении параметра несоответствия можно определить значение оптимального радиуса ядра в зависимости от размера частицы.

Литература

1. Gryaznov V.G., Kaprelov A.M., Romanov A.E., Polonskii L.A. Channels of relaxation of elastic stresses in pentagonal nanoparticles. Phys. stat. sol. (b). 1991. Vol.167. № 2. P. 441-450

2. Yacaman M.J., Ascencio J.A., Liu H.B., Gardea-Torresdey J. Structure shape and stability of nanometric sized particles J. Vac. Sci. Technol. B. 2001. Vol. 19. P. 1091-1103

3. Koga K., Sugawara K. Population statistics of gold nanoparticle morphologies: direct determination by HREM observations. Surf. Sci. 2003. Vol. 529. P. 23-35; Marks L.D., Peng L. Nanoparticle shape, thermodynamics and kinetics. J. Phys.: Condensed Matter. 2016. Vol. 28. P. 053001

4. Bhattarai N., Khanal S., Velazquez-Salazar J.J., Jose-Yacaman M. Advanced Electron Microscopy in the Study of Multimetallic Nanoparticles. Springer. 2015

5. Ding Y., Sun X., Wang Z.L., Sun S. Misfit dislocations in multimetallic core-shelled nanoparticles. Appl. Phys. Lett. 2012. Vol. 100. P. 111603

6. Kolesnikova A.L., Gutkin M.Yu., Proskura A.V., Morozov N.F., Romanov A.E. Elastic fields of straight wedge disclinations axially piercing bodies with spherical free surfaces. Int. J. Solids Structures. 2016. Vol. 99. P. 82-96

7. Gutkin M.Yu., Kolesnikova A.L., Krasnitskiy S.A., Romanov A.E. Misfit Dislocation Loops in Composite Core–Shell Nanoparticles. Phys. Solid State. 2014. Vol. 56, P. 723-730

8. M.Y. Krauchanka, Krasnitskiy S.A., M.Yu. Gutkin, Kolesnikova A.L., Romanov A.E., Aifantis E.C. Generation of circular prismatic dislocation loops in decahedral small particles. Scripta Mater. 2018, Vol.146. P.77-81

# Напряженной состояние упругого цилиндра с включением в виде длинной треугольной призмы

Красницкий С.А., Смирнов А.М.
Научный руководитель — профессор, д.ф-м.н. Гуткин М.Ю.
Университет ИТМО, Санкт-Петербург
krasnitsky@inbox.ru

Композитные нанопроволоки типа «ядро-оболочка» обладают превосходными электронными и оптическими свойствами и находят широкое применение при создании новых устройств для оптоэлектроники, фотоники и спинтроники [1,2]. Известно, что стабильность физических свойств таких структур зависит от различных структурных факторов, включая несоответствие решеток, разницу в коэффициентах температурного расширения материалов ядра и оболочки, а также присутствия дефектов на границе раздела фаз композита [3,4]. На сегодняшний день существует ряд теоретических моделей, описывающих зарождение дефектов, в частности, дислокаций несоответствия [5,6]. В этих моделях используется осесимметричное решение теории упругости для композитной нанопроволоки с цилиндрическим ядром. На самом деле ядра имеют форму многогранных призм с плоскими границами раздела [7-8]. Поэтому этот подход не позволяет учесть эффекты, связанные с концентрацией напряжений в вершинах включения. Более того, он не может быть применим для теоретического описания скольжения дислокаций вдоль плоских межфазных границ. Простейшей геометрической моделью нанопроволоки типа «ядро-оболочка» с плоскими границами раздела является упругий цилиндр с включением в виде длинного параллелепипеда.

Ранее найдено решение краевой задачи в теории упругости для упругого цилиндра с эксцентрическим включением в виде параллелепипеда прямоугольного сечения, подвергнутого собственной всесторонней дилатации [9,10]. Рассматривая суперпозицию таких включений, получены поля напряжений для упругого цилиндра с включением в виде треугольной призмы. Данное решение, удовлетворяющее уравнениям равновесия и граничным условиям на свободной поверхности цилиндра, планируется использовать для анализа физических приложений, а именно исследования критериев зарождения дислокационных дефектов в композитных нанопроволках типа «ядро-оболочка» с ядром в виде длинной треугольной призмы [7].

Литература

1. Dimakis E, Jahn U, Ramsteiner M, et al., 2014 Nano Lett. 14 2604-2609
2. Qian F, Gradecak S, Li Y, Wen C-Y and Lieber C M 2005 Nano Lett. 5 2287-2291
3. Sneed B T, Young A P and Tsung C 2015 Nanoscale 7 12248
4. Muralidharan N, Carter R, Oakes L, Cohn A P and Pint C L 2016 Scientific Reports 6 27542
5. Gutkin M Y, Ovid'ko I A and Sheinerman A G 2000 J. Phys.: Condens. Matter 12 25 5391
6. Gutkin M Y and Smirnov A M 2015 Acta Materialia 88 91-101
7. Jenichen B, Hilse M, Herfort J and Trampert A 2015 J. of Crystal Growth. 410 1-6
8. Aksoy B, Kalay Y E, and Unalan H E 2014 Journal of Crystal Growth 392 20-29
9. Krasnitckii S A, Smirnov A M and Gutkin M Y 2016 J. Phys.: Conf. Ser. 690 012022
10. Krasnitckii S A, Kolomoets D R, Smirnov A M and Gutkin M Y 2017 J. Phys.: Conf. Ser. 816 012043

# Исследование влияния знакопеременного деформирования на силовые параметры процесса прямого выдавливания

Крутиков П.В.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Ларин С.Н.
ТулГУ, Тула
Peter212@yandex.ru

Современные методы математического моделирования и анализа процессов обработки металлов давлением дают нам возможность выбрать оптимальные скоростно-силовые и геометрические параметры операций выдавливания.

Широкое распространение осесимметричных полых стаканов и втулок с различной толщиной стенки объясняет актуальность исследований, проводимых с задачей оптимизации таких операций как выдавливание, вытяжка, ротационная вытяжка и т.д. Среди названных способов получения осесимметричных деталей выделяется операция выдавливания, а в особенности, прямого выдавливания, совмещенного со свободным истечением металла в ходе формирования внешней стенки детали. Такая схема деформирования в разы увеличивает стойкость инструмента (матрицы и пуансоны), а так же расширяет номенклатуру получаемых изделий за счет увеличения относительной высоты детали. Применяя указанную схему деформирования мы можем получать детали с относительной высотой до 7-9, а также существенно повысить износостойкость инструмента, что является актуальной задачей при внедрении новых технологических процессов в крупносерийное производство.

Знакопеременное деформирование дает существенный эффект для снижения технологической силы за счет совмещения операции осадки, раздачи и непосредственно выдавливания заготовки из матричной полости. Такой подход позволяет снизить технологическую силу на 30-40% по сравнению с аналогичной технологией, включающей в себя классическое прямое выдавливание.

Были проведены экспериментальные исследования в программных комплексах Qform 3D и Deform 3D, которые подтвердили гипотезу о снижении технологической силы за счет совмещения нескольких операций в одну. На данный момент подана и одобрена заявка на патент на изобретение нового способа холодного прямого выдавливания. Изготовлен комплект универсальной штамповой оснастки, проводятся испытания на разрывной машине Instron на базе кафедры МПФ ТулГУ. По результатам натурного эксперимента планируется создать матрицу планирования, на основе которой будут выведены необходимые зависимости для конкретного процесса получения полых осесимметричных деталей. Имеется достаточно широкий диапазон варьирования диаметров заготовки и детали (от 8 до 16 мм). Кроме того, планируются исследования с применением разных материалов для заготовки, что позволить расширить номенклатуру изделий. Совмещение метода конечных элементов и натурного эксперимента даст наиболее полное представление о характере течения металла в полости матрицы сложной формы, а применение различных размеров матриц и пуансонов позволит создать универсальные рекомендации для большого числа деталей, актуальных для авиационной отрасли промышленности.

Экономический эффект, который способна дать технология выдавливания с использованием знакопеременной схемы деформирования, является одним из ключевых факторов при внедрении подобных процессов в производство. Стоит отметить, что планируемый экспериментальный анализ изменения микроструктуры заготовки до и после деформации позволит также дополнить упомянутые исследования и найти связь между получением детали с более мелкозернистой структурой и эксплуатационными свойствами готового изделия.

# Механические свойства двумерной ауксетической конструкции

Лаврентьев С.Ю.
Научный руководитель — д.ф-м.н. Соловьёв Н.Г.
ИПМех РАН, Москва
1993serj@gmail.com

В зависимости от знака коэффициента Пуассона материалы могут быть неауксетиками если коэффициент Пуассона положительный и ауксетиками если этот коэфициент, соответственно, отрицательный. Коэффициент Пуассона характеризует отношения относительного поперечного сжатия к относительному продольному растяжению. При положительном коэффициенте материалы сжимаются в поперечном направлении, а при отрицательном коэффициенте Пуассона расширяются.

На данный момент в исследовании ауксетиков можно выделить следующие основные направления: построение ауксетических стержневых моделей и структур [1-6], получение композитов с эффективным отрицательным коэффициентом Пуассона [5,7], исследование ауксетических кристаллических материалов [5,8-10]. Ауксетические стержневые модели и структуры могут использоваться как элементы нового класса композитов.

В работе экспериментально исследовано механическое поведение двумерной конструкции с отрицательным коэффициентом Пуассона. В ауксетических конструкциях часто структурным элементом является вогнутый шестиугольник с прямыми сторонами. В данной работе предложен новый дизайн вогнутого шестиугольника, в котором часть прямых элементов заменена на криволинейные элементы. Образец, размерами 110×20×0.7 мм был изготовлен из неауксетического полиэтилентерефталата (ПЭТ-а аморфный), методом лазерной обработки фемтосекундным лазером. При обработке фемтосекундным лазером практически полностью отсутствуют побочные эффекты, связанные с нагревом материала. Таким образом механические свойства материала остаются прежними на всем образце. Поперечный размер элементов шестиугольников равен толщине образца (т.е. достигается квадратное сечение элементов). Образец был подвергнут монотонному одноосному растяжению до момента, когда он еще оставался плоским. В результате обработки экспериментальных данных построена диаграмма растягивающая сила - перемещение, а также исследована изменчивость коэффициента Пуассона в зависимости от инженерных деформаций. Анализ показал, что в результате растяжения ауксетической конструкции максимальная продольная деформация составила (до потери устойчивости) 99%, а максимальные поперечные деформации — 59%. Упругие деформации достигают 2%. Коэффициент Пуассона, определенный по аналогии с упругими малыми деформациями, меняется в интервале от –0.19 до –0.60 при увеличении продольных и поперечных деформаций.

Рассмотренная ауксетическая конструкция может в дальнейшем использоваться в композиционных материалах для получения новых материалов с заданными механическими свойствами.

Литература

1. R.F. Almgren. J. Elasticity 15 (4), 427 (1985). DOI: 10.1007/BF00042531

2. A.G. Kolpakov, Prikl. Mat. Mekh. 59, 969 (1985).

3. D.Y. Fozdar, P. Soman, J.W. Lee, L.-H. Han, S. Chen, Adv. Func. Mater. 21 (14), 2712 (2011). DOI: 10.1002/adfm.201002022

4. L.J. Gibson, M.F. Ashby, G.S. Schajer, C.I. Robertson. Proc. Royal Soc. London A 382, 25 (1982). DOI: 10.1098/rspa.1982.0087

5. T.-C. Lim, Auxetic Materials and Structures. Springer Singapore. (2015) 588 p. DOI: 10.1007/978-981-287-275-3

6. H.M.A. Kolken, A.A. Zadpoor, RSC Adv. 7(9), 5111 (2017). DOI: 10.1039/C6RA27333E

7. R.V. Goldstein, V.A. Gorodtsov, D.S. Lisovenko. Eur. Journal of Mechanics - A/Solids 63, 122 (2017). DOI: 10.1016/j.euromechsol.2017.01.001

8. R.H. Baughman, J.M. Shacklette, A.A. Zakhidov, S. Stafström, Nature 392(6674), 362 (1998). DOI: 10.1038/32842

9. R.V. Goldstein, V.A. Gorodtsov, D.S. Lisovenko. Mech. Solids, 45(4), 529 (2010). DOI: 10.3103/S0025654410040047

10. R.V. Goldstein, V.A. Gorodtsov, D.S. Lisovenko. Phys. Status Solidi B, 250(10), 2038 (2013). DOI: 10.1002/pssb.201384233

## Математическое моделирование распространения волн в слоистой среде с вязкопластическим проскальзыванием

Ледовских Д.С.
Научный руководитель — профессор, д.ф-м.н. Никитин И.С.
МАИ, Москва
d_ledovskih@list.ru

В данной работе на основе обобщенной модели с нелинейными условиями скольжения [1] численно решается нестационарная задача о прохождения упругой волны через слоистый пакет с тонкими вязкопластическими прослойками.

Методом асимптотического осреднения [2,3] построена уточненная модель слоистой среды с нелинейными вязкопластическими условиями проскальзывания на межслойных границах. В уравнениях модели учтены члены вплоть до 2-го порядка по параметру толщины слоя. Предложена численная разностная схема для решения полученной нелинейной системы уравнений, основанная на явной аппроксимации уравнений движения и неявной аппроксимации остальных уравнений, содержащих малый параметр в знаменателях свободных нелинейных членов. Нелинейные неявные разностные уравнения решены аналитически с использованием метода разложения по малому параметру. Схема работает для широкого класса нелинейных функций, описывающих вязкопластическое скольжение на межслойных границах.

Приведен пример численного расчета прохождения поперечной упругой волны через слоистый пакет, обладающий эффективными анизотропными вязкопластическими свойствами. Также численно решена двумерная задача об отражении системы волн, возбуждаемых поверхностным локализованным нестационарным источником, от указанного слоистого пакета. Проведено сравнение динамики скоростей точек поверхности для чисто упругого решения и решения с учетом влияния заглубленного слоистого пакета, а также влияния параметра толщины слоев.

Подобные модели могут быть полезными при решении динамических задач сейсморазведки и интерпретации волновых картин, полученных в процессе ее проведения.

Литература

1. Nikitin I.S., Burago N.G., Nikitin A.D. Continuum Model of the Layered Medium with Slippage and Nonlinear Conditions at the Interlayer Boundaries// Solid State Phenomena. 2017. Vol. 258. Pp. 137-140.

2. Бураго Н.Г., Никитин И.С. Уточненная модель слоистой среды с проскальзыванием на контактных границах // Прикладная математика и механика. 2016. Т.80. № 2. С. 230-241.

3. Бахвалов Н.С., Панасенко Г.П. Осреднение процессов в периодических средах. М.: Наука. 1984. 352 с.

4. Никитин И.С. Динамические модели слоистых и блочных сред с проскальзыванием, трением и отслоением. //Изв. РАН. МТТ. 2008.

№ 4. С.154-165.

# Моделирование процесса зарождения трещин в конечно-элементной модели пористого алюминиевого сплава с различным характером расположения пор

Ледяев М.Е., Полянская Л.В., Писарев А.В.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Воронин С.В.
СНИУ им. С.П. Королёва, Самара
sillmarllion@mail.ru

Упорядоченная пористая структура материала позволяет повысить удельные механические характеристики. Данный эффект достигается благодаря тому, что поры, в данном случае, выполняют функцию упрочняющей фазы с нулевой плотностью. Процесс эксплуатации изделий, как правило, сопровождается двумя стадиями: деформация материала и его разрушение. Стоит отметить, что эксплуатация материала, в ряде случаев, продолжается даже на стадии образования и распространения трещины. Исключением являются те случаи, когда распространение трещины носит катастрофический характер. Однако, процесс зарождения и распространения трещины в пористом материале может отличаться от характера разрушения компактного материала. Т.к. поры могут выполнять двойную роль: одновременно являясь концентраторами напряжений и стопорами для распространения трещины. Поэтому целью данной работы является определение мест локализации зарождения трещин в зависимости от типа пористой структуры.

В качестве объекта исследования были выбраны конечно-элементные модели с квадратным и шахматным расположением пор. Для определения влияния количества пор на характер образования мест зарождения трещин были построены конечно-элементные модели с четырьмя и девятью порами. Конечно-элементный анализ проводился в программном продукте MSC.Nastran. Конечно-элементным моделям задавались механические свойства алюминиевого сплава АД1 в нагартованном состоянии. Таким образом, было сделано допущение, что материал абсолютно упругий, тем самым исключив пластическую деформацию. Данные модели подвергались одноосному растяжению. Процесс моделирования зарождения и движения трещин осуществлялся с помощью разработанного авторской программы-приложения (макрос). В алгоритм макроса заложены два основных принципа. Первый – трещина образуется в том месте, где максимальные напряжения превосходят предел прочности материала. Второй – трещина двигается в том направлении, где затрачивается минимум работы для ее продвижения.

В результате анализа четырех конечно-элементных моделей уставлено, что при квадратном расположении пор, в моделях с четырьмя и девятью порами, очагами зарождения трещин являются поры, расположенные ближе к краю образца. Характер направления трещины стремится к краю образца. В случае шахматного расположения пор в модели четырех пористого образца направление больших трещин направлено вглубь материала, в отличие от случая с квадратным расположением пор. Следует отметить, что в конечно-элементной модели присутствуют трещины меньшей длины, направленные к краю образца. В случае модели с девятью порами, очагами зарождения трещин являются поры, расположенные в среднем ряду. Трещины направлены от них симметрично к рядам пор, расположенным ближе к краю образца. Так же наблюдается зарождение малых трещин на центральных порах крайних рядов, направленных вглубь материала.

# Исследование эффектов запаздывания векторных свойств при деформировании по ломанным траекториям

Лоевец Д.А.
Научный руководитель — доцент, к.ф-м.н. Волегов П.С.
ПНИПУ, Пермь
loevetsda@gmail.com

Для удовлетворения постоянно изменяющихся потребностей экономики и промышленности необходимо разрабатывать новые материалы и конструкции. Возможно несколько вариантов создания материала с наперед заданными свойствами: это разработка технологий создания новых металлических материалов и сплавов (в том числе – с учетом химического состава, особенностей внутренней структуры и т.д.) или модификация схем обработки имеющихся материалов таким образом, чтобы после всех этапов обработки получать образцы с необходимыми эксплуатационными характеристиками. Любой материал перед массовым изготовлением и производством конструкций или изделий из него подвергается серии испытаний, позволяющих определить допустимые условия эксплуатации и подобрать физические и механические характеристики материалов таким образом, чтобы соответствующий материал или конструкция прослужили максимально долго и безопасно.

Целью исследования являлись построение и реализация математической модели, позволяющей описывать напряженно-деформированное состояние (НДС) представительного объема поликристалла на макроуровне, в частности – описывать эффекты, сопровождающие сложное, в том числе циклическое (знакопеременное), нагружение представительного объёма поликристалла при неупругом деформировании. Использование многоуровневого подхода, основанного на физических теориях пластичности, позволяет определять свойства материала не только на конечном этапе обработки, но и наблюдать за эволюцией свойств на всех этапах производства материала или конструкции. Для анализа результатов моделирования процессов сложного деформирования были использованы понятия, сформулированные в рамках теории упругопластических процессов (ТУПП) А.А. Ильюшина, которые позволяют перейти от использования тензорных параметров напряженно-деформированного состояния к геометрически более прозрачному векторному представлению соответствующих величин.

В ходе исследования реализована модель упругопластического деформирования поликристалла, позволяющая описывать эффекты, связанные с циклическим и сложным нагружением, получены качественные и количественные оценки степени проявления эффекта запаздывания векторных свойств при деформировании по траектории в виде квадрата. Проведено сравнение результатов численного эксперимента с использованием двухуровневой модели неупругого деформирования с данными полученными из натурного эксперимента. Получены зависимости напряженно-деформированного состояния при деформировании по циклическим (знакопеременным) траекториям, а также по траекториям, имеющим постоянную кривизну. Также в рамках исследования реализованы численные эксперименты, позволяющие оценить степень проявления эффекта «нырка» напряжений при деформировании по траекториям с изломами. В ходе этих экспериментов были получены количественные оценки степени проявления этого эффекта.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-1298.2017.1.

# Нелинейная динамика и устойчивость упругих элементов нано- и микросистемной техники в связанных термоэлектрических полях

Лукин А.В., Попов И.А.
Научный руководитель — профессор, д.ф-м.н. Скубов Д.Ю.
СПбПУ, Санкт-Петербург
lukinalexei@yandex.ru

В связи с интенсивным развитием микро- и наносистемной технологии большое внимание научного сообщества стало направляться на изучение новых физически нелинейных связанных задач (электро-, магнито-, термоупругости и др.), описывающих сложные процессы работы различных приборов и устройств на базе нано/микроэлектромеханических систем (НЭМС/МЭМС). Так, важнейшей характеристикой широкого класса объектов нано- и микросистемной техники (узкополосные высокочастотные фильтры, акселерометры, высокоточные актуаторы и др.) является добротность резонансных свойств. Стремление к увеличению рабочих частот приводит к миниатюризации данных устройств. Однако экспериментальные исследования показывают, что добротность резонаторов значительно уменьшается вместе с их размерами, в том числе и для монокристаллических материалов [1]. Изучение различных механизмов диссипации и степени их влияния на добротность нано- и микромасштабных систем представляет большой практический интерес. Другой практически важной и далеко не полностью изученной областью исследований является проблема динамической устойчивости элементов конструкций. В ряде современных работ [2,3] показано, что критические значения динамических усилий, при которых происходит потеря устойчивости, могут существенно отличаться от известных статических (Эйлеровых) значений. Указанное явление встречается при применении лазерных технологий для неразрушающего контроля конструкций и изучения физических свойств материалов на микро- и наномасштабном уровне, а также при осуществлении технологических процессов производства элементов нано- и микросистемной техники [4-6]. Необходимость решения подобного класса задач возникает также и при исследовании работоспособности нано- и микроэлектромеханических систем в условиях ударно-импульсных тепловых воздействий.

В первой части работы выполняется анализ влияния термоупругой диссипации на добротность нано- и микроэлектромеханических резонаторов. Рассмотрена задача о малых колебаниях в окрестности нетривиального положения равновесия круглой проводящей пластинки в поле одного неподвижного электрода с учетом процесса рассеяния механической энергии упругих колебаний путем её превращения в тепло. Аналитическое решение задачи определяется с помощью проекционных методов решения нелинейных краевых задач и задач на собственные значения. Согласно результатам расчетов, зависимость добротности от геометрических параметров пластинки не является монотонной, что с качественной стороны согласуется с оценкой, полученной Зинером [7]: максимальное затухание в системе наблюдается при совпадении частоты колебаний с эффективной скоростью релаксации. Сопоставление аналитических и численных результатов позволило верифицировать методику численного расчета задач подобного класса.

Во второй части работы исследуется динамика и устойчивость упругого элемента электростатического преобразователя, моделируемого в виде балки Бернулли-Эйлера, в условиях импульсного теплового (лазерного) воздействия. Принято, что действие лазерного импульса на поверхность балки сводится в основном к появлению теплового фронта, распространяющегося по её объему. Неравномерность и нестационарность поля температуры как по толщине, так и по длине балки в общем случае приводят к появлению изгибающего момента и осевого усилия, ответственных за возможную потерю устойчивости. В целях некоторого упрощения задачи лазерное воздействие считается равномерным по

длине балки. С помощью аналитических методов решения нелинейных краевых задач эллиптического типа получено исходное положение равновесия балки под действием электростатического поля. Найдено поле температуры в балке при действии лазерного импульса. Указано на возможность потери устойчивости положения равновесия при нагреве упругого элемента лазерным импульсом. Определены области в пространстве параметров импульса, соответствующие устойчивости и неустойчивости указанного положения равновесия.

Литература

1. Lifshitz R., Roukes M. L. Thermoelastic damping in micro- and nanomechanical systems. Condensed Matter Physics. 1999. 114-36

2. Беляев А.К., Морозов Н.Ф., Товстик П.Е., Товстик Т.П. Параметрические резонансы в задаче о продольном ударе по тонкому стержню. Вестник С.Петерб. ун-та. 2016. Сер.1.

3. Лаврентьев М.А., Ишлинский А.Ю. Динамические формы потери устойчивости упругих систем. Докл. АН СССР. 1949. Т. 64. № 6. С. 776–782

4. Sun Y., Ma J. et.al. Analytical solution of transient heat conduction in bi-layered circular plate irradiated by laser pulse. Canadian Journal of Physics. 2016

5. Poletkin K., Kulish V. et. al. Thermal properties of thin films studied by ultrafast laser spectroscopy: Theory and experiment. International Journal of Heat and Mass Transfer. April, 2014.

6. Xinwei Wang, Xiafan Xu Thermoelastic waves in metal induced by ultrafast laser pulses. Journal of Thermal Stresses. № 25. 2002. P. 457-473.

7. Zener C. Internal Friction in Solids I: Theory of Internal Friction in Reeds. Physical Review. V. 52. 1937. P. 90–99

## Изотермическое формоизменение алюминиевых тонкостенных листовых изделий в режиме кратковременной ползучести

Матасов И.И.

Научный руководитель — доцент, д.т.н. Ларин С.Н.

ТулГу, Тула

pasynkovandre@gmail.com

Конструкции, включающие в себя один или несколько листовых слоев ячеистой формы применяются для корпусов топливных емкостей, а также для внешних корпусов деталей, крыльев, обтекателей и т.д. Одновременно при повышенной прочности эти конструкции характеризуются небольшим весом и равнопрочностью при нагружении. Существующие технологии получения конструкций ячеистой формы составляют в основном процессы фрезерования и электрохимической обработки. Перспективными в плане изготовления этих конструкций выглядят технологии горячего медленного деформирования избыточным давлением газа. Были получены выражения, позволяющие получить подход к моделированию изотермического свободного деформирования в матрицах квадратной формы, в условиях кратковременной ползучести. Для чего рассмотрим формоизменение листа толщиной в матрице квадратной формы с реализацией режима кратковременной ползучести под давлением. Материал проявляет анизотропные свойства. Предполагается, что заготовка вырезается из листа так, что сторона ее совпадает с направлением оси (перпендикулярно направлению прокатки). Заготовка закреплена по внешнему контуру.

При моделировании предполагаем, что напряженное состояние заготовки плоское. Изделие при формоизменении приобретает профиль в виде сферы. При деформировании считаем, что вдоль осей симметрии профиль представляет собой окружность.

Получены зависимости для определения давления и критических режимов, с помощью которых был выполнен теоретический анализ изотермического формоизменения.

Вычисления производились для сплава АМг6. По результатам были получены зависимости влияние закона нагружения, геометрии изделия, механических свойств заготовки на напряжения, деформации, давление операции и критические режимы процесса.

Выполнив анализ показанных зависимостей, было установлено, что с увеличение процесса формоизменения до какого-то предела происходит заметный рост относительной высоты заготовки и уменьшение значения относительной толщины заготовки в верхней части изделия и в точках ее фиксации. Выявлено, что изменение относительной толщины в куполе заготовки осуществляется более интенсивно по сравнению с изменением относительной толщины в месте ее закрепления. Сравнение результатов теоретических и экспериментальных данных дает удовлетворительный результат.

Полученные в ходе моделирования выражения, позволяют получить подход к моделированию изотермического свободного деформирования в матрицах квадратной формы, в условиях кратковременной ползучести, на основании которых выполнена теоретическая оценка изотермического формоизменения листовой заготовки в режиме вязкого течения. Установлены зависимости влияния закона нагружения, геометрии изделия, механических свойств заготовки на напряжения, деформации, давление операции и критические режимы процесса изотермической пневмоформовки в режиме кратковременной ползучести.

Работа выполнена в рамках грантов РФФИ № 16-48-710016 и гранта администрации Тульской области.

## Исследование влияния температурно-скоростного режима нагружения на процессы интенсивных неупругих деформаций

Микрюков А.О.
Научный руководитель — доцент, к.ф-м.н. Волегов П.С.
ПНИПУ, Пермь
anto-mikryuko@yandex.ru

При описании процессов термомеханической обработки (ТМО) с точки зрения характера пластического деформирования материала в конкретном режиме ТМО, особое влияние на свойства и внутреннюю структуру материала оказывают два параметра воздействия: температура и скорость деформирования. Это объясняется тем, что температура определяет лидирующий механизм неупругого деформирования, а влияние скорости деформирования на процессы неупругой деформации металлов и сплавов необходимо рассматривать совместно с температурным влиянием в силу конкурирующих процессов упрочнения, разупрочнения и накопления поврежденности [1]. В силу этого неупругие деформации классифицируются на низко-, средне-, и высокотемпературные. Классификация обусловлена механизмами неупругой деформации, соответствующими конкретным диапазонам температур: для диапазона температур от 0 до 0,3Тп (низкотемпературные пластические деформации) основными выступают термоактивируемые механизмы, такие как скольжение дислокаций и двойникование; для диапазона температур от 0,3 Тп до 0,5Тп (низкотемпературные пластические деформации) характерны атермические механизмы, к которым относят внутризеренное скольжение; а для температур от 0,5Тп (или высокотемпературных деформаций) – диффузионные механизмы, например, дислокационная и/или диффузионная ползучесть [2].

Для описания механизмов неупругого деформирования, которые вносят наибольший вклад в процесс деформирования материала в зависимости от температурно-силового режима воздействия, в работе используется двухуровневая математическая модель неупругого деформирования, основанная на методологии физических теорий пластичности [3]. В качестве определяющих соотношений на макро- и мезоуровне используется закон Гука

в скоростной релаксационной форме, для связи масштабных уровней используется кинематическая гипотеза Фойгта. Также принимается гипотеза об аддитивности упругих и неупругих составляющих тензора деформации скорости. В модели мезоуровня принимается гипотеза об аддитивном разложении неупругой составляющей меры скорости деформации на скорости низко-, средне- и высокотемпературных деформаций, которые, в свою очередь, позволяют учитывать различные механизмы неупругого деформирования. В работе предполагается, что основным механизмом для низкотемпературных деформаций выступает скольжение дислокаций по кристаллографическим системам скольжения, к среднетемпературным относится механизм дислокационной ползучести, а для высокотемпературных – механизм диффузионной ползучести.

В рамках работы была разработана и численно реализована двухуровневая математическая модель неупругого деформирования представительного объема поликристаллического тела с ОЦК решеткой, которая позволяет описать вышеперечисленные механизмы неупругого деформирования, в том числе – учесть влияние скорости деформирования и температуры на процесс деформирования. Выполнена серия численных экспериментов при использовании различных схем нагружения, параметров материала, температуры и скорости деформации. На основании проведенных численных экспериментов получены деформационные кривые материала, зависимости для технического предела текучести, построена карта лидирующих механизмов неупругого деформирования в зависимости от температурно-скоростного режима, а также оценен вклад каждого из конкурирующих механизмов неупругой деформации.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-1298.2017.1.

Литература

1. Полухин П. И. Физические основы пластической деформации. Учебное пособие для вузов / П. И. Полухин, С. С. Горелик, В. К. Воронцов. – М.: Металлургия, 1982. – 584 с.

2. Чадек Й. Ползучесть металлических материалов / Й. Чадек.– Москва.: Мир, 1987. – 305 с.

3. Трусов П. В., Волегов П. С., Кондратьев Н. С. Физические теории пластичности: учебное пособие. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2013. – 244 с.

## Задача о качении с проскальзыванием периодической системы цилиндров по вязкоупругому основанию

Мифтахова А.Р.

Научный руководитель — академик, д.ф-м.н. Горячева И.Г.

МФТИ, Долгопрудный

mif-almira@yandex.ru

В данной работе рассматривается контактная задача в двумерной постановке о качении периодической системы цилиндров по основанию, которое состоит из вязкоупругого слоя, сцепленного с жёсткой полуплоскостью. Модель Кельвина используется для описания характеристик слоя в нормальном и касательном направлениях. Цель работы – изучение взаимного влияния областей контакта при различных расстояниях между центрами цилиндров.

Рассмотрим задачу об установившемся качении со скоростью V системы цилиндров с периодом l по основанию в направлении оси Ox, толщина вязкоупругого слоя задана h. При качении область контакта каждого из цилиндров и основания делится на зоны сцепления и проскальзывания. Нормальные и касательные перемещения связаны с соответствующими напряжениями с помощью соотношений для одномерной модели Кельвина. В работе предлагается метод расчёта распределения нормального и касательного напряжений в

области контактного взаимодействия. Проводится анализ влияния расстояния между цилиндрами на распределения контактных напряжений и конфигурацию области контакта при заданных свойствах вязкоупругого слоя.

Ранее проводились исследования зависимости контактных характеристик от расстояния между центрами цилиндров [1, 2], которые показали, что деформационная составляющая коэффициента трения меньше при более плотном расположении инденторов. В данной работе сначала проводится расчёт распределения нормального напряжения в области контакта, затем касательного напряжения, причём тангенциальные напряжения направлены противоположно скоростям проскальзывания.

Получены распределения нормальных и касательных перемещений точек поверхности вязкоупругого слоя и определена конфигурация области контакта. Благодаря неполному восстановлению деформаций свободной поверхности вязкоупругого слоя при достаточно малом расстоянии между неровностями при заданной нагрузке отличаются распределения нормальных напряжений в области контакта каждого цилиндра. В данной работе проведён анализ влияния плотности расположения цилиндров на распределение нормальных и касательных напряжений на площадке контакта и расположение границ зон сцепления и проскальзывания. Изучена зависимость коэффициента сцепления от расстояния между цилиндрами при заданной скорости качения и податливости вязкоупругого слоя.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 14 29 00198).

Литература

1. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия // Москва: Наука. 2001. С. 480.

2. Любичева А.Н. Анализ взаимного влияния пятен контакта при скольжении периодической системы неровностей по вязкоупругому основанию винклеровского типа // Трение и износ. 2008. №2. Т. 29. С. 125–133.

## Экран от конвективного теплообмена

Михалева А.Д.
Научный руководитель — доцент, д.т.н. Лебедев В.В.
МГСУ, Мытищинский филиал, Мытищи
anastasia.mihaleva0812@yandex.

Суть работы заключается в выравнивании температурного поля в пространстве вентилируемого фасада здания между внешней стороной стены и декоративной облицовкой [1-4]. Обычно это пространство исключают из расчётов, не учитывают тепловые потоки, рассматривают только декоративные свойства фасада. Однако в зазоре между стенками существует градиент температурного поля, потому что, например, зимой внешняя сторона стены здания всегда более нагрета по сравнению с декоративной облицовкой. Следовательно, имеет место свободная конвекция. Если в зазоре вентилируемого фасада уменьшить или даже полностью исключить перепад температур между стенкой и облицовкой, то свободная конвекция также уменьшится или даже полностью прекратится. Сделать это можно только после определения температурных полей в конструкциях.

Если посмотреть на стену здания сбоку, то она представляется отрезком. Значит, можно применить параболическое одномерное уравнение теплопроводности в частных производных. Температуру воздуха в зазоре вентилируемого фасада будем предполагать равной температуре облицовки. При возникновении градиента температуры сразу же появится дополнительная конвекция и дополнительные потери тепла. Материалы стены и облицовки различные, имеют разные коэффициенты температуропроводности – это тоже учитывалось при исследовании. Исследование свелось к решению двух смешанных начально-краевых задач для параболического уравнения в частных. Краевые задачи были

решены методом Фурье. Решения были получены в виде рядов Фурье. По этим двум решениям была вычислена разность температур стенки и облицовки в каждой точке по высоте конструкции. Плотность свободного конвективного потока тепла прямо пропорциональна этой разности температур. Полученные решения в виде рядов Фурье были введены в программу MathCAD-14 для анализа с различными коэффициентами температуропроводности. Были исследованы два вида конструкций. Во-первых, кирпичная стена и тонкий алюминиевый экран с небольшим воздушным зазором между ними. Во-вторых, деревянная стена и тонкий алюминиевый экран. Алюминиевый экран – это фольга. В каждом варианте были изучены два случая: экран снаружи стены и экран изнутри стены. Расчётная схема задачи – это два рядом расположенных стержня с термостатированными концами. На один стержень происходит резкое температурное воздействие, в какой-то части стержня температура скачкообразно возрастает. После температурного удара вследствие, например, открытия и закрытия форточки, температура в обоих стержнях начинает изменяться вследствие теплопроводности, но изменяется она по-разному, поэтому возникает разность температур и дополнительный свободный конвективный теплообмен с потерями тепла. Задача анализа свелась к определению потерь тепла при различных конструкциях, материалах и вариантах установки экрана относительно стены здания.

Даже начальное исследование свободного конвективного теплообмена в зазоре вентилируемого фасада позволило получить важный результат о возможности уменьшения теплопотерь сравнительно простым и дешёвым способом – установкой тонкого листа алюминиевой фольги на внутреннюю сторону декоративной облицовки. Иными словами, перед установкой декоративной облицовки на вентилируемый фасад надо с помощью строительного степлера прикрепить лист тонкой алюминиевой фольги, типа пищевой, на обрешётку, на которую будет крепиться облицовка.

С практической точки зрения монтаж конвективного экрана не вызывает ни технологических, ни экономических трудностей.

Литература

1. Михалёва А.Д. Роль конвективного теплообмена в устойчивости ограждающей конструкции / Строительство — формирование среды жизнедеятельности. - Электронный ресурс: сборник трудов XX Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых (26–28 апреля 2017 г., Москва). - М-во образования и науки Рос. Федерации, Нац. исследоват. Моск. гос. строит. ун-т. - Электрон. дан. и прогр. (73,7 Мб). — Москва : Изд-во Моск. гос. строит. Ун-та, 2017. — Режим доступа: http://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkrdostupa/ — Загл. с титул. экрана. - ISBN 978-5-7264-1660-1.- С.1023-1025.

2. Богословский В. Н. Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха): Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. школа, 1982. 415 с.: ил.

3. Волков А.А., Б.И. Гиясов Б.И., Челышков П.Д., Седов А.В., Стригин Б.С. Оптимизация архитектуры и инженерного обеспечения современных зданий в целях повышения их энергетической эффективности // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. - №6, с. 111.

3. Гиясов Б.И. Влияние развития инфраструктуры городов на жилую среду// Вестник МГСУ- 2012. - №4.

4. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. Изд. Авок-Пресс: 2006.

## Анализ эффекта траншейного барьера на подвижную группу нагрузок с помощью численного моделирования Abaqus

Низамаев Т.М.
Научный руководитель — профессор, д.ф-м.н. Кузнецов С.В.
МГСУ, Москва
zaqwsx27@mail.ru

В данной работе построена численная модель для анализа распространения акустических волн в упругом полупространстве вдоль пути движения группы подвижных нагрузок. В программном комплексе Abaqus выполнено моделирование полупространства, на котором на заданном расстоянии приложены нагрузки, движущиеся с одинаковой скоростью. Скорость выбрана исходя из предыдущих исследований автора, является трансзвуковой и имеет максимальные амплитуды колебаний на поверхности полупространства на линии движения нагрузок.

На определенном расстоянии от линии движения был размещен траншейный волновой барьер и исходя из изменения его геометрических характеристик проведен анализ колебаний поверхности упругого полупространства, в зоне, находящейся за барьером.

Математический аппарат данной задачи рассмотрен ранее в [1], где с помощью преобразований Фурье и Лапласа получены выражения для перемещений и напряжений.

Надо отметить, что для компьютерного моделирования задачи о распространении волн в полупространстве или полуплоскости, чаще всего используют двумерную модель [2], которая требует меньших вычислительных ресурсов. В данной работе рассмотрена пространственная конечноэлементная модель, в расчетах применялись явные разностные схемы типа Лакса – Вендроффа.

Для анализа влияния геометрических характеристик полого траншейного барьера на амплитуду колебаний проведен ряд численных экспериментов, которые отчетливо показали зависимость изменения характерной картины колебаний поверхности за барьером от его геометрических характеристик. В частности, было обнаружено, что барьер в виде пустой траншеи или траншеи, заполненной акустически более мягким материалом, чем окружающий грунт, дает значительно лучшие результаты в снижении уровня колебаний, чем аналогичный барьер, заполненный акустически более жестким материалом.

Проведенные исследования могут представлять практический интерес в связи с вибрационной защитой зданий и сооружений, расположенных вблизи линий железнодорожного транспорта, трамвайных путей, линий наземного метро.

Литература

1. Горшков А.Г., Медведский А.Л., Рабинский Л.Н., Тарлаковский Д.В. Волны в сплошных средах. -М.: Физматлит, 2004. 472 с.

2. L.Andersen, S.R.K. Nielsen. Reduction go ground vibration by means of barriers or soil improvement along a railway track. - Solid Dynamics and Earthquake Engineering, 2006, vol.25, p.701-706.

## Построение и применение парных силовых потенциалов взаимодействия для моделирования структурного перехода ГЦК-ОЦК

Мущак Н.Д.
Научный руководитель — доцент, к.ф-м.н. Подольская Е.А.
СПбПУ, Санкт-Петербург
niky-m@yandex.ru

В настоящее время с развитием технологий изготовления конструкционных материалов приобретают актуальность задачи, связанные с определением механических, в том числе

прочностных, свойств объектов, которые обладают практический бездефектной монокристаллической структурой. Понятие прочностных характеристик конструкционных материалов тесно связано с устойчивостью их внутренней структуры. При потере устойчивости кристаллическая структура тел претерпевает изменения, вследствие чего материал приобретает иные механические свойства. Под структурным переходом понимается процесс изменения внутренней упорядоченности атомов, и, вообще говоря, он связан с потерей устойчивости, поэтому изучение этих процессов является актуальной задачей в современной механике.

Простейшие парные силовые потенциалы (например, Леннард-Джонса, Морзе или Ми) позволяют моделировать пластичность, образование неоднородностей, в том числе трещин, температурное изменение свойств материала и структурные переходы. Такая универсальность располагает к широкому использованию парных силовых потенциалов, но существуют ограничения, которые не позволяют применять перечисленные потенциалы при описании поведения неплотноупакованных структур.

Целью данной работы является моделирование структурного перехода ГЦК-ОЦК с использованием двух парных силовых потенциалов особого вида, предложенных в данной работе. Эти потенциалы обеспечивают устойчивое ненапряжённое состояние для обеих структур, обладают большим, по сравнению с простейшими парными силовыми потенциалами, количеством параметров и, следовательно, позволяют описать широкий спектр материалов.

Первый потенциал представляет собой кусочно-заданную функцию, построенную на основе двух потенциалов Морзе, то есть обладающую двумя потенциальными ямами, благодаря чему обеспечиваются условия равновесия для ненапряженных ГЦК и ОЦК структур. Процесс построения потенциала, а также его анализ представлены в работе [1].

Второй потенциал также был построен на основе потенциала Морзе с добавочным слагаемым, отвечающим за наличие второго локального минимума. Данный потенциал является шестипараметрическим, а кусочно-заданный потенциал имеет тринадцать параметров.

Далее, проведено исследование устойчивости ГЦК структуры при конечных деформациях для обоих потенциалов. Алгоритм исследования приведен, например, в работе [2]. Получены зоны устойчивости в трехмерном пространстве деформаций, соответствующих растяжению/сжатию вдоль осей кубической симметрии ГЦК решетки (результат для первого потенциала представлен в работе [1]).

В процессе анализа областей устойчивости были идентифицированы структуры, которым соответствует та или иная область устойчивости: ГЦК, ромбическая гранецентрированная, а также ОЦК.

Построены кривые для одноосного нагружения вдоль одной из осей кубической симметрии и профили потенциальной энергии деформации на пути деформирования, соединяющем ненапряженные ГЦК и ОЦК структуры. Показано, что в отличие от потенциалов Леннарда-Джонса и Морзе, предложенные потенциалы позволяют получить профили энергии с двумя ярковыраженными локальными минимумами, соответствующими ненапряженным ГЦК и ОЦК структурам. Таким образом, данные потенциалы позволят описывать фазовые переходы в металлах, сохраняя возможность аналитического анализа системы частиц.

Проведена верификация полученных потенциалов с помощью метода динамики частиц, в рамках которой было показано соответствие областей устойчивости полученным аналитически, а также исследованы двухфазные состояния вдоль линии одноосного сжатия ГЦК-ОЦК.

Литература

1. Мущак Н.Д., Подольская Е.А., Панченко А.Ю. Построение парного силового потенциала взаимодействия для моделирования структурного перехода ГЦК-ОЦК // Неделя науки СПбПУ. – 2017. – ИПММ – №. 1. – С. 184-186.
2. Podolskaya E. A. et al. Loss of ellipticity and structural transformations in planar simple crystal lattices // Acta Mechanica. – 2016. – V. 227. – №. 1. – P. 185.5.

## Описание механизмов разрушения в моделях неупругого деформирования поликристаллических тел

Овчинников Е.И.
Научный руководитель — доцент, к.ф-м.н. Волегов П.С.
ПНИПУ, Пермь
efm620@gmail.com

При моделировании процессов обработки металлов и(или) эксплуатации металлических изделий особое внимание необходимо уделять физически корректному описанию механизмов накопления поврежденности и разрушения, поскольку проблема разрушения, равно как и задача определения диапазонов допустимых внешних воздействий, является первостепенной для современной механики. Решение этой комплексной задачи осложнено тем, что известно большое количество механизмов накопления и эволюции поврежденности, а также теорий и моделей, позволяющих описывать процессы деформирования металлов. В рамках большинства из таких моделей потенциально возможно описание механизмов накопления поврежденности, однако для наиболее корректного описания этих механизмов необходимо наделять используемый математический аппарат совершенно определенным и прозрачным физических смыслом. С этой точки зрения представляется вполне обоснованным применение подхода, основанного на физических теориях пластичности (ФТП), который широко используется при описании процессов интенсивных пластических деформаций металлов. Подход, основанный на ФТП, подразумевает непосредственное рассмотрение механизмов и носителей процессов деформирования на мезо- и микромасштабных уровнях, а деформируемый материал рассматривается как иерархическая система, в которой носители процесса деформирования распределены по различным масштабным и структурным уровням, поэтому для корректного описания таких систем необходимо строить многоуровневые модели.

В подавляющем количестве случаев в рамках ФТП ведущим механизмом неупругого деформирования выбирается скольжение краевых дислокаций по соответствующим кристаллографическим системам. В связи с этим, в работе предпринята попытка описания процесса образования микротрещин согласно механизму Зинера-Стро. Суть механизма заключается в том, что краевые дислокации, двигаясь в плоскости скольжения, встречают на пути препятствие и под действием напряжений тесно прижимаются друг к другу, из-за чего дислокационные экстраплоскости сливаются, а под ними образуется микротрещина. Трещина образуется в плоскости, перпендикулярной плоскости скольжения дислокаций. На первом этапе решена задача определения поля напряжений некоторого скопления дислокаций, поджатых у непреодолимого препятствия. Получена зависимость значения характерного расстояния между дислокациями в скоплении от количества дислокаций в скоплении. Под характерным расстоянием понимается то расстояние, на котором, напряжение, создаваемое скоплением дислокаций, равно критическому сдвиговому напряжению на рассматриваемой системе скольжения. Исходя из анализа результатов численных экспериментов, можно сделать вывод о том, что значение характерного расстояние достигает «насыщения» и перестает изменяться при количестве дислокаций в скоплении, равном некоторому пороговому значению, конкретная величина которого зависит от упругих и пластических характеристик исследуемого материала. Полученные на

микроуровне результаты в дальнейшем будут использованы для описания процесса накопления поврежденности на мезоуровне.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-1298.2017.1.

## Математическая модель для описания накопления поврежденности в приграничной области в поликристаллических материалах

Озерных В.С.
Научный руководитель — доцент, к.ф-м.н. Волегов П.С.
ПНИПУ, Пермь
ozernykh@yandex.ru

При интенсивных пластических деформациях (ИПД) поликристаллических материалов важно учитывать эволюцию их внутренней структуры [1]. Так, например, для ИПД характерно появление внутренних полей напряжений в отдельных зернах, которые затормаживают или ускоряют движение других дислокаций; эти поля напряжений способствуют развитию процессов упрочнения, разупрочнения и накопления поврежденности, наблюдаемых на уровне мезоскопической структуры материала. Особое значение при этом имеют эволюционирующие в процессе деформирования поля внутренних («обратных») напряжений, возникающие вблизи границ зерен в результате формирования сложных дефектных структур в приграничной области.

Для описания процессов, приводящих к разрушению материала, удобно ввести понятие «поврежденность». Под поврежденностью понимается некоторая мера, характеризующая количество дефектов специального типа (микротрещин или микропор) в рассматриваемом материале в данный момент деформирования, непрерывно или скачкообразно изменяющаяся в процессе деформирования. При достижении этой мерой некоторого критического значения можно предсказать момент разрушения материала. По типу механизмов и локализации дефектов поврежденность можно разделить на внутризеренную и межзеренную. В рамках работы рассматривается механизм межзеренного накопления поврежденности, для которого характерно образование и развитие дефектов вблизи границ зерен.

Зернограничное упрочнение обусловлено увеличением напряжений, необходимых для движения дислокаций в зернах в направлении границы зерна. Кроме того, подобное увеличение внешних напряжений при некоторых условиях может привести к образованию микротрещин в приграничной области. Для удобства в описании процессов упрочнения и накопления поврежденности в материале вводится понятие дислокации ориентационного несоответствия (ДОН), под которой понимается некоторый линейных дефект на границе зерен, образовавшийся в результате перехода решеточных дислокаций из одного зерна в другое сквозь границу. ДОНы создают собственные поля напряжений, которые оказывают влияние на движение дислокаций во всех системах скольжения сопрягающихся зерен [2].

В работе показано, что внутренние поля напряжений, создаваемые ДОНами, оказывают существенное влияние на движение решеточных дислокаций: появление таких полей напряжений ДОН может привести к блокировке активной системы скольжения в направлении границы, что в свою очередь, приведет к формированию скоплений дислокаций одного знака в приграничной области. Дальнейшее неупругое деформирование по такой системе скольжения приведет к формированию микротрещины. Получено, что в процессе деформирования поврежденность материала может снизиться вследствие активизации вторичных систем скольжения, в результате чего дислокации «обходят» барьер, образованный на рассматриваемой системе скольжения.

В рамках работы предложен способ учета полей внутренних напряжений через введение «обратных» напряжений в соотношении для скоростей сдвигов дислокаций [1] по системам

скольжения. Введено понятие эффективных касательных напряжений на системах скольжения, численно равных разности действующих и обратных касательных напряжений. Получены критические значения эффективных напряжений, достижение которых может привести к появлению микротрещин вблизи границ зерен.

Предложенный способ учета зернограничного упрочнения позволяет явным образом учесть средний размер зерна в материале. Получено, что для материала с более мелким зерном предел текучести оказывается выше.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-1298.2017.1.

Литература

1. Трусов П.В., Волегов П.С., Нечаева Е.С. Многоуровневые физические модели пластичности: теория, алгоритмы, приложения// Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4-4. – С. 1808-1810.

2. Кондратьев Н.С., Трусов П.В. Описание упрочнения систем дислокационного скольжения за счет границ кристаллитов в поликристаллическом агрегате// Вестник ПНИПУ. Механика. – 2012. – № 3. – С. 78-97.

## Градиент плотности материала как независимая степень свободы сплошной среды

Окатьев Р.С.
Научный руководитель — доцент, к.ф-м.н. Зубко И.Ю.
ПНИПУ, Пермь
okatjevrs@gmail.com

Развитие существующих и построение новых неклассических моделей сплошных сред является актуальной задачей. Это связано с необходимостью предсказывать механические свойства и описывать поведение при различных воздействиях новых наноструктурированных композитов, проектируемых аддитивных и функционально-градиентных материалов, метаматериалов. Свойства таких материалов сильно зависят от их микроструктуры, зачастую наблюдается сильная неоднородность физических свойств вплоть до атомарного уровня. Классические модели механики сплошной среды обычно оказываются в данном случае неприменимы, так как не учитывают поведение среды на мезо- и микромасштабах.

В данной работе под неклассическими моделями понимаются среды, отличающиеся от классического континуума Коши. Широко распространенными примерами таких моделей являются континуум Коссера [1] (микрополярный континуум), а также микроморфный континуум, который был предложен независимо Миндлином [2] и Эрингеном [3].

Математически поведение данных сред можно описать, приписывая каждой точке континуума набор трех некомпланарных полярных векторов – d-векторов или директоров. Тогда микродеформация среды выражается в изменении их метрических характеристик и взаимной ориентации [4].

В случае жесткой деформации набора директоров, то есть поворота как единого целого, имеем микроморфную среду. Модель, в рамках которой помимо жесткого поворота директоры могут только удлиняться или укорачиваться, называется microstretch-continua [5]. Наконец, если позволить директорам изменять свое относительное положение, получим микроморфный континуум. Таким образом микроморфную среду можно считать обобщением континуума Коссера.

При построении новых моделей можно выделить два глобальных подхода [6]. Первый основан на записи уравнений баланса физических величин и формулировки определяющих

соотношений. При этом задача построения таких соотношений является весьма нетривиальной. Также возникает проблема в записи корректных граничных условий.

Второй подход основывается на применении различных вариационных принципов, в основном принципа наименьшего действия Гамильтона и принципа виртуальных мощностей. При таком подходе граничные условия формулируются «автоматически» из получаемого вариационного уравнения. Однако при этом необходимо дополнительно устанавливать применимость тех или иных принципов, например, принцип Гамильтона следует применять только к консервативным системам.

При использовании вариационного подхода необходимо определять вид функционала. Для принципа Гамильтона таким функционалом является лагранжиан среды, который в общем случае является скалярнозначной функцией независимых кинематических переменных среды, а также их градиентов и производных по времени. Определение вида лагранжиана для среды со сложными свойствами является задачей, идентичной по сложности задаче построения определяющих соотношений.

В работе рассматривается среда, для которой независимой кинематической переменной является градиент плотности материала в текущей конфигурации. Показано, что при этом независимым является также второй деформационный градиент [7]. Из принципа наименьшего действия были получены уравнения движения такой среды и корректные граничные условия.

Литература

1. Cosserat E., Cosserat F. Theorie des Cops Deformables. Paris: Hermann, 1909. 242 p.

2. Mindlin R.D. Microstructure in linear elasticity// Archive of Rational Me-chanics and Analysis, 1964. – N1. – Pp. 51-78.

3. Eringen A.C., Suhubi E.S. Nonlinear theory of simple micro-elastic solids// Int. J. Engng. Sci., 1964. – V.2. – Pp. 189-203.

4. Ковалев В.А., Радаев Ю.Н. Каноническая полевая теория термоупругого континуума с тремя полярными директорами// Вестник ЧПГУ им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2016. – №3(29). – С. 11-40.

5. Eringen A.C. Theory of thermos-microstretch elastic solids// Int. J. Engng. Sci., 1990. – V.28. –Pp. 1291-1301.

6. Auffray N., dell'Isola F., Eremeyev V.A., Madeo A., Rosi G. Analytical continuum mechanics à la Hamilton-Piola least action principle for second gradient continua and capillary fluids// Mathematics and Mechanics of Solids, 2015. – V.20. – Iss.4. – Pp. 375-417.

7. Zubko I.Yu. Measures of discontinuities for crystal damaging// Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences, AIP Conference Proceedings, 2017. – V. 1895. – Pp. 080006-1-7. (doi: 10.1063/1.5007400)

## Разработка специальной конструкции установки для технологического процесса профилирования металлических ободьев

Петрухин Н.В.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Панфилов Г.В.
ТулГУ, Тула
WildTor@yandex.ru

В совокупности проблем, решаемых современной промышленностью, актуальной является проблема обработки металлов, с максимальной производительностью, технологичностью, экономией материалов, а также вопросы, связанные с созданием универсального оборудования и оснастки.

В данном контексте остро стоит вопрос разработки широкономенклатурных установок для различных технологических процессов профилирования металлов с целью создания

широкого спектра профилей для всевозможных уплотнительных изделий, таких как: прокладки, сальники, обжимы, гидроуплотнители и т.д.

Качество металлических профилей для таких деталей прямо влияет на показатели надёжности оборудования, т.е. на долговечность, ремонтопригодность, сохраняемость и безотказность.

Существует множество типов оборудования, позволяющего получать профилированные металлические ободья, но одним из их главных недостатков является узкие технологические возможности по изменению геометрии профиля и габаритных размеров детали, а также их относительная дороговизна, не позволяющая существенно снизить себестоимость конечного изделия.

В ходе литературного и патентного поиска было выяснено, что существует возможность для изменения конструкции оборудования с целью решения вышеупомянутых проблем. Была разработана специальная конструкция установки для технологического процесса профилирования металлических ободьев. Она отличается низкой себестоимостью, широким диапазоном выбора формы профиля, а также размеров получаемых ободьев, что существенно снижает количество необходимого оборудования для исследуемого процесса формоизменения. Проводится моделирование её работы в программном комплексе Qform, с целью нахождения основных зависимостей, отражающих характер поведения материала в ходе деформации. Создана трёхмерная модель в системе автоматизированного проектирования SolidWorks, позволяющая визуализировать работу установки, выполнять прочностные расчёты, а также необходимая в будущем для создания комплекта конструкторской документации с целью внедрения её в существующие технологические процессы.

Ведётся работа по оформлению заявки на патентование разработанного устройства, а также создания экспериментального образца установки, который позволит провести необходимые натурные испытания для подтверждения теоретических расчётов.

Стоит отметить, что внедрение подобного рода приспособлений позволит не только снизить себестоимость профилирования металлических ободьев, но и повысить качество получаемых деталей.

## Исследование влияния высокоэнергетического электромагнитного поля на пластичность алюминиевого сплава Al+Li

Пинкус Д.Р., Пинкус Ю.В.
Научный руководитель — профессор, д.ф-м.н. Беклемишев Н.Н.
МАИ, Москва
dianapinkus92@gmail.com

Одним из эффективных способов увеличения пластичности конструкционных материалов является высокоэнергичное электромагнитное поле (ВЭМП). При значении плотности удельных энергий диссипируемых в образце до определенного значения наблюдается существенное увеличение предельной степени деформации нагружаемого материала [1].

Для определения технологических параметров процессов обработки материалов давление с использованием ВЭМП введена величина, определяющая степень деформации через скорость интенсивности деформации и время деформации.

Эксперименты проводились в раздельном режиме воздействия механической нагрузки и ВЭМП с использованием стенда Р10 и НИИ-40 ИПМех РАН [2]. В процессе эксперимента проводилось сначала механическая нагрузка, а затем осуществлялось воздействие ВЭМП.

Установлено, что увеличение пластичности для определенных видов нагрузки при взаимодействии ВЭМП составляет ~20%.

Литература

1. Д.А. Троицкий, Ю.В. Баранов, Ю.С. Абрамов, А.Д. Шленин «Физические основы и технологии обработки современных материалов(теория, технология, структура и свойства) Т.1; Инст. комп. ислед. М. Ижевск 2004, 500 стр.

2. К.В. Кукуджанов «Моделирование воздействия высокоэнергетического импульсного электрического поля на микротрещины в поликристаллическом металле» Вестник ПНИУ, Механика №4, 2015г.

## Описание прерывистой пластичности при помощи дислокационной динамики

Попов Ф.С.
Научный руководитель — профессор, д.ф-м.н. Трусов П.В.
ПНИПУ, Пермь
popovfyodor@yandex.ru

В настоящее время при изготовлении различных деталей в автомобильной и авиационной промышленности, которые должны обладать достаточной коррозионной устойчивостью и устойчивостью к внешним воздействиям, используются различные сплавы из алюминия. Однако при существующих режимах обработки металлов и сплавов давлением часто возникает ряд негативных эффектов, которые, в свою очередь, снижают коррозионную устойчивость, приводят к снижению предела текучести и др. Одним из наиболее известных эффектов, возникающих в деформируемых сплавах, является динамическое деформационное старение (ДДС). При повышенных температурах и невысоких скоростях деформирования ДДС приводит к возникновению прерывистой пластичности (ПП). С точки зрения макроэкспериментов на одноосное нагружение образцов ПП проявляется на деформационных кривых в виде повторяющихся неоднородностей: ступенек или зубцов. На макрообразцах ПП проявляется в виде полос сдвига и соответствующих шероховатостей поверхности. Одной из актуальных задач является описание процесса ДДС, приводящего к возникновению ПП, с использованием моделей дислокационной динамики. Дислокационные модели для описания внутренней структуры представляются более физически обоснованными и наглядными по сравнению с существующими макрофеноменологическими моделями. Однако известные дислокационные модели требуют дальнейшего развития. В предлагаемой работе вводятся понятия мобильных и иммобильных дислокаций, рассматриваются различные взаимодействия дислокаций друг с другом, а также с атомами примеси и барьерами. Возникновение ПП обусловлено не только взаимодействием дислокаций, но и диффузионными процессами, происходящими во время пластического деформирования. На основе данного факта в работе вводится следующее уточнение: процесс диффузии можно представить как совокупность двух процессов, а именно – решеточной диффузии и туннельной диффузии, происходящей вдоль линий дислокаций. Последнее, в свою очередь, обусловливает непостоянство коэффициентов диффузии, их зависимость от текущей внутренней структуры, в частности, от значений плотностей дислокаций и плотностей барьеров по системам скольжения. На текущем этапе работы получены зависимости плотностей дислокаций и критических напряжений по СС от деформаций для монокристаллического образца без учета диффузионных эффектов; на основе полученных результатов можно судить о применимости предлагаемой дислокационной модели для описания рассматриваемых процессов неупругого деформирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-41-590694-р_а).

# Разработка оснастки для проведения многофакторного эксперимента для процесса прямого выдавливания

Поцелуев К.О.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Панфилов Г.В.
МАИ, Москва
Potseluev.97@mail.ru

Моделирование различных типов оснастки и инструмента для процессов формоизменения материалов сопряжено с рядом технологических трудностей и задач, решение которых часто бывает необходимо для успешной отработки новых технологий и приемов, используемых в производстве. В настоящее время в машиностроительной отрасли, а также научных исследованиях, связанных с всевозможными производственными процессами в области обработки металлов давлением широкое распространение получили методы исследования и анализа процессов формоизменения с применением многофакторного эксперимента, что в значительной степени повышает качество и достоверность теоретических исследований.

В работе рассматриваются различные вопросы, возникшие при проектировании оснастки, предназначенной для проведения многофакторного эксперимента с использованием программного комплекса Qform 3D. Исследуется процесс прямого выдавливания, причем используются конструкция универсального штампа со сменными матрицами, втулками и пуансонам, что дает возможность провести необходимое число опытов с разной конфигурацией штамповой оснастки. Нахождение зависимостей изменения напряженно-деформированного состояния заготовки и силовых параметров при формоизменении с заданными параметрами и граничными условиями является ключевой задачей при проведении многофакторного эксперимента в среде Qform 3D. Кроме того, проблемы, решаемые про разработке чертежей и другой конструкторской документации различных видов штамповой оснастки для экспериментов с использованием метода конечных элементов, являются так же актуальными и для дальнейшей разработки и изготовления реального инструмента для прямого выдавливания.

Изначально необходимо было решить вопрос об интервале варьирования габаритными размерами заготовок, а так же толщиной стенок изделия (в нашем случае за базовый технологический процесс и реально существующую деталь, которую можно получить методом прямого выдавливания, была взята технология получения гильзы Luger 9x19). Например, установлено, что оптимальным интервалом варьирования фактора внешнего диаметра заготовки для рассматриваемой схемы деформирования был промежуток от 1 до 2 исходных диаметров заготовки, используемых в реальном технологическом процессе.

Непосредственно при разработке чертежей и 3д моделей оснастки был решен вопрос механической обработки рабочих поверхностей матриц и пуансонов, а так же проблема применения матриц с различной конфигурацией геометрии рабочей полости: коническая, коническая с пояском, цилиндрическая и т.д. Важно учесть, что подобная работа была проведена и для пуансонов, которые имеют не только различные размеры по диаметру, но и разную геометрическую конфигурацию рабочего профиля: плоская, коническая, сферическая выгнутая, сферическая вогнутая и т.д.

Итогом работы является полный пакет конструкторской документации с реальными 3Д моделями, которые можно использовать как для проведения экспериментов в Qform 3D, так и для изготовления реальной штамповой оснастки, используемой для натурных экспериментов, что может существенно расширить исследовательский потенциал работы, а так же позволить провести сравнительный анализ моделирования процессов холодного выдавливания с помощью метода конечных элементов и реального процесса выдавливания.

# Подход к моделированию операции изотермической вытяжки осесимметричной детали в конической матрице из анизотропного материала в режиме кратковременной ползучести

Романов П.В.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Платонов В.И.
ТулГУ, Тула
pvi_1@rambler.ru

Современные тенденции развития промышленного производства предполагают переход к использованию новых материалов и технологий их обработки. К сожалению, большинство труднодеформируемых и высокопрочных материалов, активно используемых в авиационной и ракетно-космической технике, трудно поддаются классическим операциям обработки давлением при комнатной температуре. На производстве возникают огромные проблемы, связанные с трудностями проектирования и подготовки новых технологических процессов, т.к. зачастую отсутствуют не только данные механических характеристик используемых материалов, но и методики расчетов элементарных операций формоизменения труднодеформируемых материалов, требующие предварительного нагрева и поддержание специальной безокислительной атмосферы.

Расчет операций обработки металлов давлением с использованием титановых сплавов осложнен тем, что титановые сплавы относятся к труднодеформируемым материалам при обычных условиях штамповки из-за их низкой пластичности. Поэтому важным фактором при изотермической штамповке являются сведения о пластических свойствах материала при заданных температурных режимах изотермической штамповки. Основной характеристикой пластичности является относительное равномерное удлинение, определяемое по результатам испытания образца при растяжении путём измерения значения его удлинения после растяжения. При комнатной температуре материал обладает значительной плоскостной анизотропией. При повышении температуры испытания до определенных величин плоскостная анизотропия сохраняется. При температуре нагрева, когда в заготовке происходят фазовые и структурные изменения, материал становится трансверсально-изотропным и ориентация заготовки относительно направления к прокатке не оказывает влияние на качество получаемого изделия.

Учет всех изменений, происходящих в материале полуфабриката, требует огромного количества экспериментов и их статистической обработки. Основными факторами влияющими на возможность получения бездефектной детали в условиях изотермической штамповки являются температура, скорость и время выдержки. Зная о закономерностях изменения этих факторов всегда имеется возможность назначить рациональные технологические режимы формоизменения заготовки.

Таким образом, при рассмотрении процесса вытяжки заготовки в коническую матрицу при повышенных температурах предполагается, что исходный материал трансверсально-изотропен. Предполагается наличие потенциала скоростей деформации при ползучести и подчинение ассоциированному закону течения. В зависимости от температурных режимов и вида используемого материала заготовки его поведение можно описать уравнениями состояния кинетической или энергетической теории ползучести и повреждаемости. Подразумеваем, что процесс осуществляется при плоском напряженном состоянии.

Приведенные предположения и допущения использованы при разработке математической модели операции изотермической вытяжки в конической матрице для оценки напряжений, деформаций и силовых режимов.

**Влияние гидростатического давления на свойства фуллеранов**

Рысаева Л.Х.
Научный руководитель — д.ф-м.н. Баимова Ю.А.
ИПСМ РАН, Уфа
lesya813rys@gmail.com

В настоящее время актуальна проблема изучения свойств и многообразия углеродных наноструктур, а так же поиск новых углеродных материалов. Уже было доказано, что среди материалов на основе атома углерода можно найти структуры с уникальными и интересными физическими свойствами: углеродные аллотропы, такие как графен, фуллерены и нанотрубки, наноленты; наноалмазы, 3D-графены, алмазоподобные фазы (УАФ). Алмазоподобные углеродные наноструктуры представляют собой довольно широкий диапазон материалов, которые могут использоваться в различных областях применения, таких как защитное покрытие, биомедицина, и др. Некоторые из этих структур представляют аморфные углеродные пленки, которые включают водород и смесь sp3 и sp2 связей. Некоторые другие представляют собой жесткие структуры с единственными типом гибридизации - sp3. Такие структуры обладают уникальными свойствами, например низким трением, химической стабильностью, высокой твердостью близкой или даже превышающей прочность алмаза. Теоретический анализ показал, что некоторые из них являются частичными ауксетиками, т.е у них наблюдается отрицательный коэффициент Пуассона [1, 2]. Для углеродных наноструктур факторами, определяющими его свойства, являются кристаллографическая размерность и число ближайших соседей для атома, поэтому исследование структурных особенностей имеет большое значение.

В настоящей работе рассматриваются стабильные алмазоподобные фазы на основе фуллереноподобных молекул (фуллераны), а их механические свойства и деформационное поведение исследуется методом молекулярной динамики. Показано что на кривых деформация-нагружение при гидростатическом растяжении могут быть выделены три участка, соответствующие разным видам деформации и изменению длин связи и валентных углов. Достаточно большие степени деформации, достижимые для УАФ, объясняются эффективными структурными перестройками, удлинением одной из ключевых связей. Вблизи точки критической деформации деформирование происходит за счет изменения валентных углов с возвратом к неравновесным значениям, после чего ресурс деформирования истощается и происходит разрыв связей. При гидростатическом сжатии происходит переход алмазоподобных фаз в аморфное состояние, что может быть охарактеризовано как видом самих кривых нагружение-сжатие, так и функциями радиального распределения.

Литература

1. Лисовенко Д.С., Баимова Ю.А., Рысаева Л.Х., Городцов В.А., Дмитриев С.В. Равновесные структуры из углеродных алмазоподобных кластеров и их упругие свойства // Физика твердого тела. 2017. Т. 59. № 4. С. 801-809.

2. Lisovenko D.S., Gorodtsov V.A., Baimova J.A., Rysaeva L.K., Dmitriev S.V., Rudskoy A.I. Equilibrium diamond-like carbon nanostructures with cubic anisotropy: elastic properties // Physica Status Solidi (B): Basic Solid State Physics. 2016. Т. 253. № 7. С. 1295-1302.

# Структурные и функциональные характеристики хром-углеродных покрытий, полученных магнетронным распылением хром-наноалмазных мишеней

Рэйляну М.Д.
Научный руководитель — к.ф-м.н. Авдюхина В.М.,
МГУ, Москва
makc.200606@gmail.com

Исследована структура покрытий, полученная методом магнетронного распыления мишеней на основе хрома и наноалмазов детонационного синтеза. При изготовлении образцов использованы массивные хромовые мишени с отверстиями, в которые помещался наноалмазный порошок (составные) и полученные методами порошковой металлургии. Изучались и покрытия, изготовленные в сходных условиях распылением мишеней чистого хрома.

Установлено, что в покрытиях, полученных с использованием чисто хромовых и составных мишеней, содержание углерода составило < 10 ат.%. В образцах, полученных в отсутствии азота, присутствовал только хром, а при напылении в присутствии азота, содержание последнего было на уровне 12÷14 ат.%, и наряду с хромом был обнаружен нитрид хрома Cr2N или карбонитридная фаза Cr2N0.4C0.6.

Трибологические испытания показали, что покрытия, полученные распылением составных мишеней, разрушались практических сразу даже при малых нагрузках, тогда как покрытие, полученное при потенциале смещения –60В оказалось более износостойким, что связано с дополнительной ионной бомбардировкой поверхности и формированием более плотной структуры с пониженной пористостью. При P = 0,1 Н они оставались вполне работоспособны, а значительные колебания величины коэффициента трения, связанные с началом фрикционно-усталостного разрушения, наблюдались при P = 0,15 Н. Показано, что покрытия с низкой работоспособностью имели нанотвердость ≤ 17 ГПа, т.е. низким микромеханическим характеристикам покрытий можно поставить в соответствие их низкую работоспособность при трении. Покрытие, полученное распылением со смещением обладало нанотвердостью ~25 ГПа - наивысшей из всех полученных на образцах этого типа.

Так как покрытия, полученные распылением составных хром-наноалмазных мишеней, содержали небольшое количество углерода и имели низкие трибологические свойства, были получены покрытия с большим его содержанием, для чего использовали мишени двух типов, приготовленные методами порошковой металлургии: компактированные методом горячего прессования (тип I) и спеченные (тип II). Мишени I типа имели неоднородную рыхлую структуру с высокой пористостью, низкую механическую прочность, легко разрушалась, и их использование при магнетронном напылении оказалось невозможным. Мишень II типа была менее пористой (с размером отдельных частиц менее 5 мкм), механически более прочной и имела более равномерный состав. Мишень такого типа содержала хром, углерод и кислород (59, 23.5 и 15.5 ат.%, соответственно). При распылении хром из нее практически полностью перенесся ионами аргона в образующееся покрытие, а кислород за счет эффектов преимущественного распыления удалился. В полученном покрытии содержалось ~40 ат.% углерода, что было сопоставимо с его содержанием в легированных хромом алмазоподобных покрытиях, ранее полученных в смеси аргона и ацетилена. Трибологические испытания показали, что хотя покрытие обладало достаточно высоким коэффициентом трения (~0.3), оно оказалось работоспособным во всем диапазоне используемых при испытании нагрузок (число циклов до разрушения N>4000 при нагрузке 0.1÷0.2 Н), что значительно превышало показатели других исследованных образцов. Таким образом, метод спекания является перспективным методом получения магнетронных

мишеней, используемых для получения хромуглеродных покрытий с высокими трибологическими свойствами.

Показано, что структура покрытий, полученных распылением составных мишеней и мишеней, полученных методами порошковой металлургии, носит композиционный характер. Исследование методом спонтанного комбинационного рассеяния показало, что углерод в покрытиях присутствует в виде отдельных сферических частиц микронного размера и их агломератов. Наблюдаемые при этом структуры являются алмазоподобными со степенью графитизации, значительно изменяющейся от частицы к частицы. Высокими триботехническими характеристиками обладали покрытия, осажденные магнетронным распылением мишеней, полученных спеканием хромового и наноалмазного порошков.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (№ 15-08-05264).

## Оценка живучести стального сетчатого купола при статическом и динамическом нагружениях

Самохвалов И.А.
Научный руководитель — профессор, к.ф-м.н. Ерофеев В.И.
ННГУ, Нижний Новгород
vantys1994@yandex.ru

Цель работы состояла в численном исследовании живучести сетчатого купола в статической и динамической постановках при условии отказа отдельных несущих элементов системы в результате аварийного воздействия. Если при отказе отдельных несущих элементов конструкция обладает способностью перераспределения усилий на соседние элементы, то можно считать, что она обладает потенциальной живучестью.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: рассмотрено нескольких вариантов обрушения несущих элементов в разных областях сетчатого купола в статической постановке и выявлены наиболее опасные зоны разрушения с точки зрения живучести конструкции; выполнен модальный анализ конструкции и выявлены наиболее неблагоприятные частоты и формы собственных колебаний; проведена оценка влияния времени действия импульсной нагрузки, необходимой для моделирования динамического эффекта при удалении части покрытия; проведен численный эксперимент по расчету сетчатого купола на живучесть в динамической постановке; сделана оценка уровня живучести купола с помощью индекса живучести.

Объектом исследования является сетчатый звездчатый купол диаметром 48 метров и стрелой подъема - 16 метров. Проведен статический расчет данного купола по действующим нормам для IV снегового района, выполнен подбор сечений элементов по первому и второму предельным состояниям. Расчёт выполнялся методом конечных элементов, с применением пакета прикладных программ «SCAD Office». В качестве модели покрытия принята пространственная КЭ-модель, учитывающая геометрические параметры и характер распределения нагрузок: собственный вес, вес покрытия, 3 вида снеговой нагрузки.

В результате проведенных исследований было выявлено, что конструкция сетчатого купольного покрытия обладает высокой живучестью, так как при выключении отдельных узлов сетки, обрушения не происходит; опасная зона, с точки зрения живучести, находится возле опорного кольца, поскольку удаление одного отдельного элемента в ней приводит к наибольшему проценту разрушения конструкции, индекс живучести здесь составляет 84,2%; значительное увеличение зоны разрушения происходит, когда время действия импульса лежит в интервале от 0.2 до 0.6 сек, дальнейшее увеличение времени действия импульса приводит лишь к незначительным изменениям; средний индекс живучести конструкции возрастает при разрушении элементов, расположенных дальше от опорного кольца и ближе к внутреннему кольцу, и изменяется от 87,7% до 94,9%; индекс живучести при разрушении

части сетчатого покрытия со стороны, незагруженной снеговой нагрузкой (при несимметричном загружении), на 4-7% выше, чем со стороны, загруженной снегом.

Работа проводилась при поддержке РФФИ (грант № 18-08-00715).

Литература

1. Кудишин Ю.И., Дробот Д.Ю. Методика расчета строительных конструкций на единичную живучесть // Сб. науч. тр. Международного симпозиума «Современные металлические и деревянные конструкции (нормирование, проектирование и строительство)». – Брест: БРГТУ. – 2009. – С. 132 - 141.

2. Самохвалов И.А., Трянина Н.Ю. Статический анализ купольного сетчатого покрытия при разрушении отдельных его несущих элементов. Труды научного конгресса 14-го Российского архитектурно-строительного форума. 2016 г. – С.80-84.

3.Самохвалов И.А., Трянина Н.Ю. Модальный анализ купольного сетчатого покрытия при потере несущей способности отдельных его узлов. Труды научного конгресса 14-го Российского архитектурно-строительного форума. 2016 г. – С.84-87.

4.Трянина Н.Ю., Тестоедов П.С. Исследование вопроса живучести стальных сетчатых покрытий.//Приволжский научный журнал, №1(33). -2015.- С. 9-15.

## Анализ влияния формы заходной части матрицы на кинематику течения металла при формоизменении плоской заготовки

Самсонов Н.А.
Научный руководитель — доцент, к.т.н. Платонов В.И.
ТулГу, Тула
samsonovn888@yandex.ru

Современное машиностроительное производство Тульских оборонных предприятий испытывает потребность в новых инновационных решениях и идеях, способных улучшить производительность труда, а так же получать детали ответственного назначения способные соответствовать необходимым критериям качества. Сложности, связанные с исследованиями, внедрениями расчетов, а так же изготовлением необходимого оборудования для анизотропных материалов на предприятиях не позволяют применить технологии, улучшающие характеристики изделий для данной среды использования.

Игнорирования исследований связанных с вытяжкой анизотропных материалов, способствует фестонообразованию, которое в свою очередь приводит к уменьшению коэффициента использования металла. Необходимость добавления второй операции (обрезки) является малоэффективным, трудозатратным действием технологического процесса. Осесимметричные цилиндрические детали, находят свое применение в оборонной промышленности, а именно изготовление различных оболочек ответственного назначения, способных выдерживать нагрузки при старте и полете ракеты. Основной технологией получение таких изделий является вытяжка. Для исследования нами была принята операция вытяжки с цилиндрический и конической матрицей, не отвечающей современным параметрам изготовления деталей из анизотропных материалов, в ввиду больших затрат на необходимость введения использования второй операции (обрезки). Изучение геометрии матриц с профильной радиальной, конусной заходной поверхностью приведет к исключению фестонооообразования при вытяжке.

Влияние анизотропных свойств материала на течение металла обуславливается скоростью перемещения края заготовки в радиальном направлении при изотермической вытяжке. С уменьшением показателя коэффициента анизотропии скорость перемещения края заготовки будет расти, и противоположно с увеличением коэффициента анизотропии скорость края заготовки уменьшается. Из-за использования стандартных цилиндрических и конических матриц процесс фестонообразования неизбежно приведет к ухудшению качества

получаемой детали и увеличению себестоимости технологического процесса получения данного вида деталей в целом. Невозможность влиять на процесс течения металла компенсируется возможностью изменять расстояние преодолеваемое металлом до контакта с основным цилиндрическим пояском матрицы и способствует равномерному течению металла по всему диаметру, вследствии чего процесс фестонообразования минимизируется. Использования таких матриц, дает возможность экономии не только на качестве изготавливаемой детали, но и на выбор прокатного листа в целом.

Проведенные нами исследования поведения перемещения края заготовки при ее формоизменении с использованием матриц с профильной заходной поверхностью, позволят добиться увеличения коэффициента использования металла на 15-20% в отличии от обычных матриц. Проведены исследования процесса вытяжки в программном комплексе Qform 3D, получены рекомендации по оптимальным технологическим конфигурациям, геометрии и форм штамповой оснастки. Получены основные зависимости течения анизотропных материалов. На основании этих зависимостей были предложены рекомендации по модернизации технологий изготовления анизотропных материалов с помощью изотермического деформирования.

## Цилиндрический изгиб пластинки из сплава с памятью формы с учетом разносопротивляемости этого материала. Мартенситная неупругость

Сафронов П.А.
Научный руководитель — профессор, д.ф-м.н. Мовчан А.А.
МАИ, Москва
www-midnight-express@yandex.ru

Сплавы с памятью формы (СПФ) являются одними из наиболее перспективных конструкционных материалов благодаря своим уникальным термомеханическим свойствам, наиболее известные из которых: накопление значительных неупругих деформаций без разрушения, восстановление первоначальной формы или инициация значительных реактивных усилий в заневоленном состоянии. Однако, широкому применению данных материалов препятствует отсутствие решения соответствующих краевых задач.

В предлагаемой работе представлены результаты численного моделирования поведения прямоугольной пластинки постоянной толщины из СПФ с учетом разносопротивляемости этого материала при чистом и консольном цилиндрическом изгибе. Рассматривается явление мартенситной неупругости на основе современной модели нелинейного поведения СПФ при фазовых и структурных превращениях [1,2], способной качественно и количественно верно описывать рассматриваемый процесс.

Не секрет, что при изгибе элемента конструкции, одна часть поперечного сечения этого элемента испытывает напряжения растяжения, а другая часть – напряжения сжатия. При испытаниях образцов из СПФ на растяжение и сжатие в режиме мартенситной неупругости установлено сильное различие кривых деформирования [3]. Поэтому, при решении класса краевых задач, посвященных изгибу элементов из СПФ, необходимо учитывать свойство разносопротивляемости.

Решение задачи о цилиндрическом изгибе пластинки из СПФ выполнено в рамках классических гипотез Бернулли-Эйлера. Принимается гипотеза о плоском деформированном состоянии в отношении компоненты тензора полных деформаций в направлении ширины пластины. Рассматриваются активные процессы пропорционального нагружения, при которых девиатор напряжений изменяется пропорционально нормальным продольным напряжениям в пластине.

Для задачи о мартенситной неупругости установлено, что свойство разносопротивляемости СПФ в значительной степени влияет на положение нейтральной

плоскости пластины, положение которой заранее неизвестно и определяется в ходе численного решения полуобратным методом системы определяющих соотношений. Помимо этого установлено, что для малых значений изгибающего момента положение нейтральной плоскости определяется отношением упругих констант СПФ или разномодульностью, в то время как для средних и больших значений изгибающего момента положение нейтральной плоскости в значительной степени зависит от разницы в значениях параметров нелинейного деформирования материала при растяжении и сжатии, или от разносопротивляемости.

Распределение нормальных продольных напряжений по сечению пластины имеет сильно нелинейный характер. Для продольных нормальных деформаций установлено, что упругая составляющая этих деформаций превосходит структурную составляющую в области малых значений изгибающего момента. Однако, для больших значений изгибающего момента картина ожидаемо становится прямо противоположной и уже структурные деформации в значительной степени превосходят упругие. При этом установлен некий порог значений изгибающего момента, больше которых эпюра неупругих деформаций испытывает состояние насыщения, тем самым возобновляется интенсивный рост упругих деформаций в поперечном сечении пластины.

Для задач о консольном цилиндрическом изгибе пластины из СПФ установлено, что прогиб аналогичной балки на четверть превышает прогиб пластины [4]. Так же установлено 20-ти процентное отличие в податливости пластинки при решении задачи о цилиндрическом изгибе с учетом и без учета свойства разносопротивляемости СПФ.

Литература

1. Мовчан А.А., Мовчан И.А., Сильченко Л.Г. Микромеханическая модель нелинейного деформирования сплавов с памятью формы при фазовых и структурных превращениях. Изв. РАН МТТ, 2010. №3, С.118-130.

2. Мишустин И.В., Мовчан А.А. Аналог теории пластического течения для описания деформации мартенситной неупругости в сплавах с памятью формы. Изв. РАН. МТТ, 2015. №2, С.78–95.

3. Yong Liu, Z. Xie, J. Van HumbeeckAnd L. Delaey. Asymmetry of stress-strain curves under tension and compression for NiTi shape memory alloys. Acta mater, 1998. Vol 46, №12, P.4325–4338.

4. Сафронов П.А. Решение задач о мартенситной неупругости и прямом фазовом превращении в балке из сплава с памятью формы с учетом упругих деформаций и разносопротивляемости этих сплавов. МКМК, 2017. №1, С.69-89.

## Волновой теплоперенос в анизотропном полупространстве в условиях волнового теплопереноса под действием точечного источника теплоты

Селиванова О.С.
Научный руководитель — доцент, д.ф-м.н. Колесник С.А.
МАИ, Москва
selivanovaolga93@gmail.com

При высоких скоростях нагрева (сотни градусов в секунду) в окрестности пространственно-временных границ (границы тела, начальное значение времени) возникает неравновесное состояние, а именно тепловой поток отстает от градиента температур, то есть тепловой поток не пропорционален градиенту температур (не выполняется классический закон Фурье, в соответствии с которым возникает парадокс бесконечной скорости распространения теплового потока) [1]. Такое отставание характеризует конечную скорость распространения теплового потока, то есть волновое распространение теплоты с возникновением фронтов разрыва температурного поля, теплового потока и второй производной распределения температур по пространственным переменным. Для учета

волновых процессов теплопроводности (локального неравновесия) используется закон Каттанео-Вернотта-Лыкова [2], в соответствии с которым к градиентному слагаемому добавляется слагаемое, пропорциональное скорости изменения теплового потока с коэффициентом пропорциональности, равным времени релаксации. Использование этого закона приводит к волновому уравнению теплопроводности.

В анизотропных средах волновой теплоперенос описывается волновым уравнением теплопроводности, содержащим смешанные производные. Для процессов, описываемых такими уравнениями, тепловые потоки в разных направлениях имеют различные скорости. Моделирование теплопереноса в анизотропных средах на основе новых аналитических решений рассматривалось в работах [3-9].

В данной работе исследуется локально-неравновесное тепловое состояние в условиях волнового теплопереноса в окрестности пространственно-временных границ анизотропного полупространства под действием точечного источника теплоты, зависящего от времени, на основе нового аналитического решения. Локальное неравновесие вызывается отставанием по времени теплового потока от градиента температуры на величину времени релаксации, отчетливо наблюдаемого в окрестности границ при малых временах, соизмеримых со временем релаксации. Показано начальное формирование нестационарного температурного поля, которое как по количественным, так и по качественным характеристикам существенно отличается от случаев отсутствия времени релаксации. В частности, на границах подвижных фронтов температурное поле претерпевает разрывы непрерывности первого рода, характерные для волнового теплопереноса. Амплитуды этих разрывов со временем стремятся к нулю, однако в любом случае вторые производные температурного профиля по пространственным переменным не являются непрерывными. Анализируются новые численные результаты. Работа актуальна в быстро протекающих процессах релятивисткой механики.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ: №18-01-00446А, и Гранта Президента РФ: МД-1250.2018.8.

Литература

1. Соболев С.Л. Процессы переноса и бегущие волны в локально-неравновесных системах // Успехи физических наук. 1991. Т. 161. № 3. С. 5–15.

2. Зарубин В.С., Кувыркин Г.Н. Математическое моделирование термомеханики. М.: Физматлит, 2002. 320с.

3. Формалев В.Ф., Колесник С.А. Аналитическое исследование теплового состояния анизотропной пластины при наличии теплообмена на свободных границах // Математическое моделирование. 2003. Т.15, №6. С.107-110.

4. Формалев В.Ф., Колесник С.А., Чипашвили А.А. Аналитическое исследование теплопереноса при плёночном охлаждении тел // Теплофизика высоких температур. 2006. Т.44, №1. С.107-112.

5. Формалев В.Ф., Колесник С.А. Сопряженный теплоперенос между пристенными газодинамическими течениями и анизотропными телами // Теплофизика высоких температур. 2007. Т.45, №1. С.85-93.

6. Формалев В.Ф., Колесник С.А. Аналитическое исследование теплопереноса в анизотропной полосе при задании тепловых потоков на границах //Инженерно-физический журнал. 2016. Т.89, №4. С.973-982.

7. Формалев В.Ф., Колесник С.А. Об обратных коэффициентных задачах теплопроводности по восстановлению нелинейных компонентов тензора теплопроводности анизотропных тел //Инженерно-физический журнал. 2017. Т.90, №6. С.1371-1379.

8. Формалев В.Ф., Колесник С.А. Об обратных граничных задачах теплопроводности по восстановлению тепловых потоков к анизотропным телам с нелинейными характеристиками теплопереноса // Теплофизика высоких температур. 2017. Т.55, №4. С.564-569.

9. Формалев В.Ф., Колесник С.А., Селин И.А. О сопряженном теплообмене при аэродинамическом нагреве анизотропных тел с высокой степенью анизотропии // Тепловые процессы в технике. 2016. Т.8, №9. С.388-394.

## Упрочнение эластомерных композитов модифицированным нанодисперсным шунгитом

Семенов П.Е.
Научный руководитель — к.т.н. Корнев Ю.В.
ИПРИМ РАН, Москва
Pavelsemenov401@gmail.com

Сегодня эластомерные композиты являются одними из перспективных конструкционных материалов. Они обладают высокой прочностью, повышенной износостойкостью. Основной вклад, определяющий механические свойства эластомерных композитов, вносят упрочняющие наполнители. В нашей работе, в качестве наполнителя, предлагается применять нанодисперсный шунгит. Шунгит состоит из аморфного диоксида кремния (примерно 60%), углерода (примерно 25-35 %) и, в количестве около 1%, имеет примеси FeS, Al2O3, ZnO, FeO и др. В виду своего состава и оптимизации размера частиц, нанодисперсный шунгит подходит в качестве упрочняющего наполнителя в эластомерные композиты.

В работе [1], в качестве модификации, применялось окисление микродисперсного шунгита перманганатом калия. В данном случае реакция, проведенная с наноразмерным шунгитовым углеродом (образец НШ-1), реализована также, как и с микродисперсным шунгитом, однако протекает интенсивнее. Это может быть связано с увеличенной площадью удельной поверхности. А также, окисленный шунгит отличается характерным бурым оттенком. Здесь имеет место адсорбция окисленным шунгитом диоксида марганца, полученного в ходе протекания реакции.

В качестве другого окислителя был взят пероксид водорода, причем концентрации порядка 30% масс. Окисление проводилось в двух различных средах суспензии: в нейтральной среде (образец НШ-2), в дистиллированной воде, и в кислотной среде (образец НШ-3), в 9%-ом растворе уксусной кислоты. Применение разных сред обусловлено тем, что в разных средах пероксид водорода обладает различной активностью.

Методика окисления шунгитового углерода пергидролью в целом зарекомендовала себя лучше, нежели чем методика с перманганатом калия, т.к. среда менее агрессивна, что связано с меньшими ресурсными затратами, например требуется меньше усилий для очистки. Другим аспектом данной методики является экологичность – отказ от применения серной кислоты и перманганата калия намного лучше может повлиять на экологическую обстановку и значительно снижает затраты экологической статьи бюджета на возможное будущее производство.

Для исследования влияния окисления шунгитового углерода на механические свойства эластомерных материалов были изготовлены резиновые смеси, наполненные нанодисперсным окисленным шунгитом на основе каучука СКС-30АРК.

В ходе работы была получена зависимость динамического модуля упругости от амплитуды деформации при частоте 10 Гц и температуре 60 оС. Данное исследование проведено для оценки эффекта Пейна [2], который характеризует взаимодействия частиц наполнителя, а также его изменения в зависимости от фактора измельчения наполнителя.

Наиболее низким значением модуля упругости обладает ненаполненный образец, а также с наполнителем НШ-1, обработанным наиболее жесткими окислителями. Наибольший модуль наблюдается у образца НШ-3, окисление которого проводилось пероксидом водорода в нейтральной среде.

Физико-механические характеристики вулканизатов на основе бутадиен-стирольного каучука СКС-30АРК, наполненные шунгитом, окисленным различными способами определялись на разрывной машине UTS-10.

Среди образцов с окисленным шунгитом, образец с НШ-1 обладал самой низкой прочностью, порядка 4,3 МПа при относительном удлинении в 331%, что меньше, чем у образца с исходным наноразмерным шунгитом. Это может быть связано с измененной структурой шунгита в ходе окисления и, возможно, дополнительной адсорбцией диоксида марганца из реакционной смеси на этапе модификации наполнителя.

Физико-механические характеристики у образца, наполненного шунгитом НШ-2, окисленным перекисью водорода в кислой среде наблюдалась прочность порядка 16,5 МПа, что на 5 МПа больше, чем у исходного образца с нанодисперсным шунгитом. У образца, наполненного шунгитом НШ-3, окисленным перекисью водорода в нейтральной среде наблюдалась прочность порядка 15,5 МПа, что примерно на 4 МПа больше, чем у исходного образца с нанодисперсным шунгитом.

На основе полученных данных наблюдается значительное влияние химической модификации наполнителя – минерала шунгит на эффект упрочнения полученных вулканизатов. Отмечается увеличение скорости вулканизации, увеличение максимального крутящего момента при определении кинетики вулканизации. При окислении нанодисперсного шунгита, для эластомерных композитов отмечается увеличение модуля упругости, бóльшие напряжения при удлинении и прочности.

Литература

1. Семенов П.Е., Корнев Ю.В., Гуськов Д.В. Усиление эластомерных композитов модифицированным микродисперсным шунгитом, Гагаринские чтения – 2017: XLIII Международная молодёжная научная конференция: Сборник тезисов докладов: М.; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2017, С. 324-325.

2. C.M. Roland. Reinforcement of Elastomers. // Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, 2016, pp 1-9.

## Влияние высокоэнергетического электромагнитного поля на некоторые характеристики конструкционной прочности проводящих материалов

Степанов Л.И.
Научный руководитель — к.т.н. Никитин А.Д.
МАИ, Москва
LIS1700@yandex.ru

В результате развития нетрадиционных методов воздействия высокоэнергетическим электромагнитным полем (ВЭМП) на проводящие материалы предложена эффективная технология обработки при значительном сокращении времени и материальных затрат с улучшением эксплуатационных характеристик.

В частности, были проведены исследования, позволяющие установить влияние высокоэнергетического электромагнитного поля на конструкционную прочность алюминиевых (Д-1 - дюраль) и титановых (В91Т2) сплавов, характеристики трещиностойкости, циклической прочности, общей долговечности. Эксперименты проводились в режиме раздельного действия механической и циклической нагрузки (усталостные испытания). Усталостные испытания проводились на установке МУИ-6000 (изгиб с вращением). Образец нагружался до заданного уровня напряжений (близкого к пределу выносливости), до различной величины от среднего значения числа циклов до разрушения (Nср-р). Таким образом в образце создавалась определенная степень накопления повреждаемости. После этого проводилась обработка высокоэнергетическим

электромагнитным полем (контактным методом) с использованием источника промышленной частоты и высокой плотности энергии НИИТ-40 (ИПМех РАН).

В обоих случаях испытаний для материалов Д-1 и В91Т2 было установлено существенное увеличение прироста долговечности: в первом случае 26%, а во втором - 39%. Полученные результаты указывают на перспективность технологии восстановления ресурса элементов конструкции газотурбинного двигателя (например, лопаток компрессора).

## Идентификация и верификация нелинейного определяющего соотношения Работнова по данным испытаний высоконаполненного полиэтилена

Стеценко Н.С.
Научный руководитель — профессор, д.ф-м.н. Георгиевский Д.В.
МГУ, Москва
stetsenkonina@mail.ru

Доклад посвящен описанию процедуры идентификации и верификации определяющих соотношений Работнова применительно к экспериментам, проведенным над полиэтиленом. Актуальность работы может быть рассмотрена с точки зрения различных позиций. Во-первых, в последнее время полиэтилен высокой плотности стал широко использоваться в качестве структурного материала, например, для труб, используемых в линиях водо- и газоснабжения. Таким образом, с одной стороны, непосредственный интерес представляет исследование механических характеристик этого материала. С другой стороны, интерес представляет сама процедура идентификации с точки зрения апробации, уточнения и выявления возможных корректировок. Продемонстрирована возможная неоднозначность определения материальных функций в условиях ограниченного количества экспериментальных данных как по наличию типов экспериментов, так и по их длительности. Показана наибольшая сложность, с которой сталкивается исследователь при проведении подобной процедуры. Идентификация проводилась из эксперимента на ползучесть при мгновенном нагружении, а верификация для экспериментов на ползучесть при мгновенном нагружении для уровней напряжения, не участвовавших в идентификации; экспериментов при постоянной скорости напряжения (для двух значений скоростей); эксперимента при ступенчатом напряжении; эксперимента при сложном нагружении, состоящем из двух участков линейного возрастания напряжения и двух участков постоянного значения для двух различных уровней нагружения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-08-01146 а

## Определение критической плоскости для многоосного циклического нагружения со сдвигом фаз

Стратула Б.А.
Научный руководитель — профессор, д.ф-м.н. Никитин И.С.
МАИ, Москва
stratula@matway.net

Опыт эксплуатации разнообразных конструкционных элементов показывает, что реальные циклические режимы и условия нагружения часто не могут быть воспроизведены в упрощённых лабораторных усталостных испытаниях, таких как растяжение, изгиб или кручение. Как правило, конструкционные элементы подвержены в условиях эксплуатации сложным трехмерным условиями нагружения. Для расчета усталостной прочности в этом случае необходимо использовать многоосные критерии усталостного разрушения. Прогресс в материаловедении привёл к появлению многоосных критериев для разных областей

усталостного нагружения, начиная с малоцикловой усталости (МЦУ, N ~ 103 - 105) и заканчивая сверхмногоцикловой усталостью (СВМУ, N ~ 108 – 1010) [1]. При рассмотрении области СВМУ важную роль играет формулировка многоосного критерия усталостного разрушения. Амплитуда внешних нагрузок в таком случае будет мала (по сравнению с пределом текучести материала), что приводит к уменьшению количества систем скольжения, активируемых в материале при усталостном нагружении. В случае малых амплитуд доминирующей становится одна система скольжения, то есть возникает выделенная плоскость, в которой происходит движение дислокаций, которую можно выделить как критическую плоскость. Это позволяет применять более современные критерии многоосного усталостного разрушения, учитывающие ориентацию такой критической плоскости.

Данная работа предлагает процедуру расчёта ориентации критической плоскости при многоосных циклических нагрузках с произвольным сдвигом фаз для классического усталостного диапазона – малоцикловой (МЦУ) и многоцикловой усталости (МНЦУ), основанную на хорошо апробированном критерии Papadopoulos [3].

На основе результатов [2] делается вывод о важности рассмотрения области СВМУ. Предлагается метод обобщения критерия для классического диапазона на случай СВМУ нагружения. Предлагается сравнение аналитических и экспериментальных результатов работ [4-5].

Литература

1. Bathias C., Paris P.C. Gigacycle Fatigue in Mechanical Practice. New York. Dekker. 2005.
2. Burago N., Nikitin I. Multiaxial Fatigue Criteria and Durability of Titanium Compressor Disks in low- and giga- Cycle Fatigue Modes.Heidelberg. Springer. Mathematical Modeling and Optimization of Complex Structures. 2016. Pp. 117-130.
3. Ioannis V. Papadopoulos. Long life fatigue under multiaxial loading. International Journal of Fatigue 23 (2001) 839-849.
4. Никитин И.С., Бураго Н.Г., Никитин А.Д., Якушев В.Л. Определение критической плоскости и оценка усталостной долговечности при различных режимах циклического нагружения // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. -2017. -№4. –С.XX-XX. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.4.14.
5. Andrea Carpinteri, Aleksander Karolczuk, Ewald Macha and Sabrina Vantadori. Expected position of the fatigue plane by using the weighted mean principal Euler angles. International Journal of Fracture 115: 87-99, 2002.

## Моделирование измельчения зеренной структуры поликристаллов в процессах интенсивных пластических деформаций

Тельканов М.А.
Научный руководитель — доцент, к.ф-м.н. Волегов П.С.
ПНИПУ, Пермь
michaelperm@gmail.com

В настоящее время проблема получения ультрамелкозернистых поликристаллических материалов стоит достаточно остро. Подобные материалы обладают повышенным пределом текучести по сравнению с крупнозернистыми материалами, поэтому область их применения весьма обширна. Однако, в настоящее время остается не ясным, какие конкретно физические механизмы и характеристики материала вносят наибольший вклад в процесс измельчения зеренной структуры, и, как следствие, отсутствует возможность управлять процессом измельчения при изготовлении материала или конструкции с целью получения наперед заданного распределения зерен по размерам и/или форме. Таким образом, задача описания

процесса измельчения зеренной структуры и построения соответствующих математических моделей остается актуальной.

Под термином «измельчение» исследователи понимают сразу несколько физических процессов, приводящих к уменьшению среднего размера зерна. К ним относят как дробление – процесс, являющийся по сути хрупким внутризеренным разрушением, так и процесс ориентационной фрагментации – относительно плавного разворота областей кристаллической решетки друг относительно друга. До последнего времени методы исследования точечных дефектов кристаллических решеток для анализа зеренной структуры материала практически не применялись, вследствие чего современные представления о механизмах измельчения в значительной мере основаны на исследовании закономерностей в изменении типов различных дислокационных структур, а также дисклинаций. Установлено, что изначально однородная дислокационная структура с увеличением деформаций трансформируется в дислокационные клубки и достаточно плотные стенки дислокаций, которые, в свою очередь, преобразуются в границы субзерен, обладающих малой разориентацией [1].

Целью работы является разработка математической модели упругопластического деформирования поликристаллического агрегата с учетом измельчения зеренной структуры материала и изменения ориентаций кристаллитов. В рамках работы используется двухуровневая математическая модель упругопластического деформирования, элементом верхнего масштабного уровня которой является представительный макрообъем поликристалла с ОЦК-решеткой, а элементами нижнего уровня – фрагменты, сгруппированные в зерна, имеющие большеугловые разориентировки. Для описания топологии фрагментно-зеренной структуры представительного объема предлагается формирование весового графа, в качестве веса дуги которого выступает значение специально введенной меры разориентации граничащих элементов, основанной на взаимном расположении проекций кристаллографических направлений этих элементов на стандартном стереографическом треугольнике. Показано, что с использованием предложенного графа можно выделять связные элементы ротации и описывать эволюцию их размеров.

Движущей силой фрагментации в литературе чаще всего называют мощные упругие напряжения, возникающие в кристаллите вследствие несовместности пластических деформаций в граничащих зернах [2]. Для учета подобной несовместности в работе используется соответствующая подмодель, подробно описанная, например, в [3]. Для описания дробления используется критерий, согласно которому, при достижении некоторой критической мощности стыковых и граничных дисклинационных дефектов становится энергетически выгодной трансформация зеренной структуры, включающая как формирование внутризеренных малоугловых границ, так и повороты кристаллических решеток зерен и их фрагментов (элементов ротации).

С использованием построенной модели была получена зависимость среднего размера зерен и доли большеугловых границ от величины накопленных деформаций. Предложен алгоритм поиска элементов ротаций с использованием графа фрагментной структуры. Показано, что мощность необратимых разворотов составляет значительную долю полной мощности системы, таким образом их учет в подобных моделях представляется необходимым.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-1298.2017.1.

Литература

1. Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. – М.: Металлургия, 1986. – 224 с.

2. Сарафанов Г.Ф., Перезвенцев В.Н. Закономерности деформационного измельчения структуры металлов и сплавов. Нижний Новгород, 2007, 96 с.

3. Трусов П.В., Ашихмин В.Н., Волегов П.С., Швейкин А.И. Моделирование эволюции структуры поликристаллических материалов при упругопластическом деформировании // Ученые записки Казанского университета. Серия: Физико-математические науки. – 2010. – № 4. – С. 225-237.

## Применение теории локального моделирования для экстраполяции дозвуковых режимов ВЧ-плазмотрона на условия входа затупленного тела в атмосферу

Тептеева Е.С.
Научный руководитель — д.ф-м.н. Колесников А.Ф.
МАИ, Москва
elrick.com@mail.ru

Лабораторное моделирование условий аэродинамического нагрева космических аппаратов при спуске с орбиты является необходимым этапом разработки систем тепловой защиты.

Современные высокоэнтальпийные газодинамические установки, в том числе ВЧ-плазмотроны [1], не позволяют осуществить полное моделирование всех факторов, влияющих на движение и нагрев аппарата при входе в атмосферу с гиперзвуковой скоростью. Поэтому принципиально важно решение вопросов [4] о соответствии параметров газовых потоков и неравновесных процессов, реализуемых в экспериментальных установках, натурным условиям, определяющим термохимическое воздействие высокотемпературного диссоциированного воздуха на тепловую защиту аппарата.

Задача состояла в установлении соответствия параметров экспериментов на ВЧ-плазмотроне ВГУ-4 по теплообмену цилиндрической модели диаметром 20 мм в дозвуковых струях воздушной плазмы и условий входа в атмосферу затупленного тела с гиперзвуковой скоростью. В качестве исходных данных при давлении 100 гПа использовались экспериментальные зависимости энтальпии и скорости воздушной струи от мощности ВЧ-генератора. Параметры обтекания цилиндрической модели дозвуковой струей воздушной плазмы пересчитаны на параметры обтекания затупленного тела гиперзвуковыми потоками воздуха с помощью теории локального термохимического моделирования [2,3], разработанной в ИПМех РАН. В результате рассчитаны таблицы скорости (4817-8711 м/с), высоты полета (57.2-66.6 км) и радиуса носка затупленного тела (0.196-0.166 м) в диапазоне мощности ВЧ-генератора 20 – 75 кВт.

## Исследование силовых параметров процесса изотермического радиального выдавливания заготовок из цветных металлов и сплавов

Тесаков Д.М.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Черняев А.В.
ТулГУ, Тула
apjelin@rambler.ru

Известно, что процессы обработки металлов давлением (ОМД) сопряжены с рядом проблем, решение которых может существенно повысить качество получаемых деталей, а также интенсифицировать производство в целом. Расширение номенклатуры получаемых деталей является одним из приоритетных направлений процессов ОМД. В настоящее время существует большое количество подходов и теоретических методов, позволяющих оценить различные параметры при осуществлении пластической деформации. В последние годы широкое внедрение в производстве летательных аппаратов, узлов для изделий, применяемых

в космической отрасли и т.д. нашло применение различных сплавов, позволяющих улучшить технические характеристики готовых аппаратов.

Промышленность требует постоянного совершенствования технологических операций и приемов, использующихся для изготовления деталей ответственного назначения с особыми требованиями к прочности, износостойкости и т.д. Из большого числа методов ОМД особенно выделяется изотермическое выдавливание, т.к. оно позволяет особенно точно контролировать напряженно-деформированное состояние заготовки в процессе деформирования, что дает нам возможность для расширения номенклатуры получаемых изделий, в частности для авиационной и космической техники. Кроме того, исследования, проводимые с различными сплавами, например, титановый сплав ВТ20, показывают, что температура является одним из самых значимых факторов, влияющих на повреждаемость заготовок при выдавливании.

Одной из достаточно широко распространенных форм изделий, применяемых в рассматриваемых отраслях промышленности, являются всевозможные патрубки со сложной формой внутренней полости. Получение таких деталей методом выдавливания имеет ряд преимуществ перед другими способами обработки металлов давлением: высокий коэффициент использования металла, интенсификация производства, улучшение качества готовых деталей.

В работе исследуются силовые параметры процесса изотермического радиального выдавливания заготовок из специальных сплавов, кроме того, анализируется характер напряженно-деформированного состояния заготовки в ходе выдавливания, что позволяет оценить предельные возможности формоизменения при изменении ключевых параметров процесса. Основным теоретическим методом, использующимся для поиска оптимальных режимов деформирования, является метод верхних оценок. Он позволяет получить достаточно точные зависимости, которые могут иметь широкое практическое применение для изготовления деталей рассматриваемой конфигурации.

В настоящее время проводится работа по обобщению результатов, полученных при помощи метода верхней оценки усилия пластического формоизменения при изотермическом радиальном выдавливании деталей из материалов, применяемых в аэрокосмической отрасли. Планируется разработка рекомендаций для технологических процессов, используемых в серийном изготовлении патрубков со сложной формой внутренней полости. Кроме того, в программных пакетах MathCAD, MathLab и т.д. о Построены графические зависимости типового процесса выдавливания, основой для которых являются закономерности, полученные ранее в ходе теоретических расчетов.

Работа имеет важное прикладное значение и широкие перспективы для внедрения в реальные производственные процессы.

## Исследование механизмов зарождения усталостных трещин в титановых сплавах при СВМУ нагружении

Тишин Н.А.
Научный руководитель — к.т.н. Никитин А.Д.
МАИ, Москва
nikitatishin5@yandex.ru

Опыт эксплуатации авиационных двигателей показывает, что досрочный выход из строя элементов газотурбинных двигателей (ГТД) связан с высокочастотным нагружением. Экспериментальное исследование спектра собственных частот лопаток показывает, что характерная вибрационная нагрузка лежит в диапазоне от 1 до 4.5 кГц. Таким образом, за счет высокой частоты, количество накопленных циклов нагружения часто превосходит 10^9 циклов, за характерный срок службы элементов ГДТ. При этом амплитуды таких вибраций

не велики, и зачастую не превосходят усталости материала. Именно с этим связан тот факт, что эти вибрационные нагрузки не учитываются при проектировании изделий, а усталостные свойства материалов определяются на базах испытаний до 10^7 – 10^8 циклов. Однако, исследования в области усталостного поведения конструкционных материалов при больших наработках (порядка 10^8 — 10^10 циклов) показывает о возможности их разрушения под действием нагрузок, не превосходящих классический предел усталости. При этом механизм зарождения усталостной трещины принципиально меняется: в отличие от областей малоцикловой (МЦУ) и многоцикловой усталости (МНЦУ), в области больших долговечностей или сверхмногоцикловой усталости (СВМУ) зарождение трещины происходит из-под поверхности.

Подповерхностное зарождение усталостных трещин в области СВМУ, как правило, связано с наличием микроструктурного дефекта. Для сталей, например, характерно наличие неметаллических включений, в алюминиевых сплавах подповерхностное зарождение связано с наличием литейных дефектов или пор и т. д. Однако, подповерхностное зарождение в СВМУ режиме, так же возможно и в отсутствие явного дефекта. Примером таких зарождение может служить трипольные точки для сталей с большим (порядка 100 микрометров) размером зерна. В случае двухфазных авиационных титановых сплавов, наличие дефектов микроструктуры является крайне редким явлением, однако сама микроструктура достаточно сложна. В данной ситуации вопрос о механизмах зарождения подповерхностной трещины при СВМУ нагружении становится актуальным.

В настоящей работе проводится анализ механизмов зарождения подповерхностных трещин в двухфазных титановых сплавах при СВМУ нагружении. Показывается взаимосвязь механизма зарождения с усталостной долговечностью образцов. Проводится анализ поверхностей излома с особенностями микроструктуры и делается вывод о позитивных и негативных влияниях ее особенностей.

## Построение методики теоретического расчета КИН, представленного через амплитуду смещений для случая высокочастотного нагружения. Расчет поправочной геометрической функции в определенном для ВЧН выражении КИН

Ткаченко В.Г., Зинин А.С.
Научный руководитель — к.т.н. Никитин А.Д.
МАИ, Москва
tkvalent@mail.ru

В авиационной, машиностроительной, нефтегазовой и во многих других областях определенные части / элементы конструкций испытывают циклические нагружения. В частности, на лопатки ГТД действуют вибрационные нагрузки, связанные с не стационарностью набегающего потока, что приводит к неравномерному распределению напряжений на лопатках двигателя, в особенности, если тот имеет достаточную величину накопленных пластических деформаций, чтобы происходило зарождение, а в дальнейшем и развитие трещин. Необходимо учитывать не только специфику нагружения конструкции, но и физические свойства материала, из которого то или иное изделие изготовлено, а также геометрические размеры элементов исследуемых конструкций.

Одним из таких основных кинематических характеристик в механике разрушения является КИН, определяющий распределение напряжений по фронту развития трещины. Выражение для КИН при статическом нагружении однозначно определено и включает в себя действующие на образец постоянные напряжения и длину трещины.

Однако в случае теоретической оценки величины КИН для случая ВЧН требуется его переопределение, поскольку параметром нагружения для случая высокочастотной нагрузки

будет являться не прикладываемые статические напряжения, а задаваемая амплитуда смещений. Тогда, производя замену указанных параметров нагружения в формуле КИН для статической нагрузки, требуется сохранить размерность кинематической характеристики, Па*м(1/2).

В настоящей работе произведен анализ размерностей для КИН, при его определении через амплитуду смещения в случае ВЧН и получена формула для КИН при указанном режиме нагружения, которая учитывает также влияние роста трещины на значения собственных частот исследуемого образца – понижение собственных частот колебаний конструкции с развитием в ней трещины следует также учитывать, поскольку ВЧН производится путем формирования в образце упругой стоячей волны, частота которой должна совпадать с собственной частотой рассматриваемого образца.

Конечная формула для теоретического расчета КИН через амплитуду смещений в случае ВЧН включает в себя неизвестную безразмерную геометрическую функцию, зависящую от отношения длины трещины к ширине образца. В работе сформулированы методики численного расчета КИН для случая ВЧН, а также приведены результаты такого расчета.

По найденным значениям КИН для каждой длины трещины (от 1 мм до 6 мм с шагом 0.5мм) определены значения неизвестной геометрической функции, упомянутой выше. Дана конечная теоретическая формулировка, однозначно определяющая КИН через амплитуду смещений для случая ВЧН.

## Исследование причины снижения точности и проведение мероприятий направленных на повышение качества собранных узлов компрессора

Тюрин А.В.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Галимов Э.Р.
КНИТУ-КАИ, Казань
kai.tyurin@gmail.com

Изучение технологического процесса изготовления лопаток показало:

а) Лопатки направляющего аппарата представленных для исследования ступеней изготавливаются по типовому технологическому процессу.

б) Обработка профиля пера, гидродробеструйная обработка и виброгалтовка приводят к деформациям (прогибу и развороту пера и полок) вследствие перераспределения напряжений в поверхностных слоях лопаток, что, в конечном итоге, ведет к снижению точности положения базовых поверхностей лопаток.

в) Выбор технологической базы связан с необходимостью повышения точности изготовления пера лопатки.

г) Для снижения погрешности, связанной со сменой баз, производится фрезеровка (пропыление) площадки.

д) Поверхность верхней полки, которая используется при сборке узла не дорабатывается, что может вносить дополнительную погрешность.

е) Контроль лопаток контролерами БТК проводится на приборах, используемых при доводке профиля, что увеличивает погрешности измерения.

Изучение технологического процесса сборки узлов направляющих аппаратов показало:

а) Сборка направляющих аппаратов производится в специальном приспособлении секциями по 10 - 12 лопаток;

б) Конструктивно чертежом допускается зазор между полками лопаток до 0,1 (и до 0,15 для 20% лопаток) однако, в связи со сложностью обеспечения гарантированного зазора между полками лопатки при сборке практически набираются плотно. При этом наблюдается образование углового зазора (касание полок в одной точке) из-за наличия конусности полок.

в) При постановке промежуточных лопаток между секциями технологически разрешается доработка их по толщине полок до 1 мм (по 0,5 мм с каждой стороны).

г) Имеющиеся в металле приспособления для доработки полок не обеспечивают требуемых условий выполнения операции. Недостатки приспособлений: нестабильность зажимного усилия и неудачный выбор точки зажима, вызывающие значительные по величине прогибы пера; невозможность фрезеровки полок со стороны спинки лопатки;

д) Отсутствуют специальные измерительные приборы для определения требуемой толщины полок промежуточных лопаток.

Анализ размеров и допускаемых отклонений лопаток и узлов направляющего аппарата показал, что номинальное значение угла установки лопатки - замыкающий размер угловой размерной цепи - равно сумме номинальных значений составляющих угловых размеров, имеет место смещение середины поля допуска на угол закрутки лопатки относительно середины поля допуска на угол установки лопатки в сборе.

В процессе сборки направляющих аппаратов представленных для исследования ступеней происходит значительный разворот пера и полок лопаток. Основной причиной разворота является увеличенной против расчетной средняя толщина полок комплекта лопаток. Причиной разворота является также нестабильные условия сборки лопаток, вызывающие различную величину разворота по секторам; погрешность положения полки относительно площадки (погрешность от смены баз) и погрешность положения лопатки в радиальном направлении. Подтвержден вывод, что клепка лопаток к лабиринту по сравнению со сборкой болта незначительно меняет качество направляющего аппарата. Показано, что токарная обработка полок разворачивает комплект лопаток в сторону уменьшения угла. Вероятной причиной изменения угла установки является разворот полок лопаток под действием сил резания при токарной обработке с попаданием стружки и заусенцев между действием сил резания при токарной обработке с попаданием стружки и заусенцев между полками; это оказывает то же действие, что и увеличение толщины верхней полки.

Для повышения точности направляющих аппаратов по углу установки рекомендуется:

1. Произвести корректировку технологического процесса изготовления лопаток;

2. Спроектировать, изготовить и внедрить в производство рабочие приспособления для доработки полок промежуточных лопаток при сборке направляющих аппаратов предположенных ступеней.

3. Спроектировать, изготовить и внедрить измерительные приборы для определения требуемой толщины промежуточных лопаток при сборке направляющих аппаратов промежуточных ступеней;

4. Спроектировать и наготовить технологический лабиринт для сборки направляющих аппаратов последней ступени.

Для дальнейшего повышения точности направляющих аппаратов по углу установки до необходимо продолжить исследовательскую работу в следующих направлениях: повышение стабильности процесса сборки направляющих аппаратов с целью уменьшения неравномерной плотности лопаток при сборке, влияющей на разворот лопаток; теоретического определения и экспериментальной проверки допустимых отклонений лопаток по углу закрутки, толщине и конусности полок, обеспечивающих требуемое качество углов направляющих аппаратов; определение причин разворота лопаток при токарной обработке полок и испытаниях двигателя; изучение влияния метода токарной обработки узла на изменение углов установки.

## Применение теории идеального течения пластических сред к дизайну процесса плоской экструзии

Фадеев Е.П.[1,2], Идрисов Д.М.[1,3]
Научный руководитель — доцент, к.ф-м.н. Лямина Е.А.
[1]ИПМех РАН, [2]МВТУ, [3]МФТИ, Москва
fadeevegor@yandex.ru

Теория идеального течения применима для описания пластического деформирования металлов, для которых справедлив критерий текучести Треска, не учитывающий влияние величины среднего напряжения, и ассоциированный закон течения. В случае стационарного идеального пластического деформирования, система уравнений, описывающая процесс, включает дополнительное требование, предполагающее, что линии тока всюду совпадают с направлениями наибольших напряжений. Существование решения и его единственность доказаны в [1]. Теория идеального течения позволяет получить наиболее равномерное распределение деформаций в конечном продукте. Получены решения для процесса экструзии листового материала [2].

В работе рассматривается модель двойного сдвига [3]. Эта модель основана на условии текучести Кулона-Мора, которое учитывает влияние среднего напряжения. Ранее показано существование решения для стационарной плоской модели идеального течения сыпучих сред [4].

В работе теория идеальных течений применена к дизайну матрицы для плоско-деформированного процесса экструзии/ волочения. Получен идеальный профиль матрицы, соответствующий различным параметрам материала для процесса экструзии/ волочения пластических материалов, описываемых моделью двойного сдвига. Решение получено методом, основанном на существовании характеристик для модели двойного сдвига. Проведено сравнения с известным решением, полученным для модели Треска. Показано, что угол внутреннего трения влияет на форму идеальной матрицы. В частности, длинна идеальной матрицы для чувствительного к среднему напряжению материалу, оказывается меньше, чем для материала, критерий текучести которого не зависит от среднего напряжения.

Литература

1. R. Hill, Ideal forming operations for perfectly plastic solids, J. Mech. Phys. Solids 15 (1967) 223-227.

2. F. Barlat, K. Chung, O. Richmond, Anisotropic potentials for polycrystals and application to the design of optimum blank shapes in sheet forming, Metall. Mater. Trans. A 25 (1994) 1209-1216.

3. A.J.M. Spencer, A theory of the kinematics of ideal soils under plane strain conditions, J. Mech. Phys. Solids (1964) 337-351.

4. Alexandrov S., Y. Mustafa, E. Lyamina, Steady planar ideal flow of anisotropic materials. Meccanica 51 (9) (2016) 2235-2241

## Разработка теории многокомпонентной среды для описания динамических процессов в материалах со сложной реологией

Федоренко Р.В., Кудрявцев А.А.
Научный руководитель — член-корреспондент, д.ф-м.н. Индейцев Д.А.
СПбПУ, Санкт-Петербург
fedorenko_rv@spbstu.ru

Динамические задачи, описывающие механические процессы в одном из компонентов в материалах со сложной реологией, очень актуальны. В таких материалах процессы в одном

из компонентов сопровождаются релаксационными процессами, приводящих к значительным изменениям в структуре других компонентов [1,2]. В экспериментах такие трансформации обычно сопровождаются добавочной слабой релаксацией, характеризующейся откликом с низкочастотным спектром.

Эта задача появляется, когда происходит лазерное облучение мультикомпонентых материалов. Среди таких материалов, особый класс представляют проводники (металлы, полупроводники). В дополнение к динамическим процессам в решетке, параллельно возбуждаются кинематические процессы в электронном газе. Взаимодействие электронов и решетки приводит к необходимости рассмотрения процессов в обеих подсистемах проводников одновременно.

Такой подход становится особенно важным в изучении динамических процессов под действием излучения лазера. В данном случае, энергия излучения лазера, как правило, в первую очередь передается подсистеме электронного газа и затем передается на решетку уже только как результат внутренних взаимодействий. При рассмотрении быстропротекающих процессов (фемто-пикосекундого уровня) требуется уже рассмотрение двухтемпературной модели, в которой температуры электронного газа и решетки имеют разные значения [3].

В данном случае классические связанные уравнения термоупругости, учитывающие прогрев материала вследствие лазерного воздействия только с помощью тепловых и термоупругих процессов в решетке, в недостаточной степени описывают формирование акустической волны. Из-за данного эффекта в данной статье изучена проблема влияния динамических процессов в электронном газе на деформационные процессы в решетке. Показано, что учет наличия в системе электронного газа может привести к качественным изменениям деформационных процессов в проводниках. В частности, значительно увеличивается время релаксации в сравнении с динамическими процессами, которые учитывают только решетку в материале.

Разработка современных методов диагностики дефектов в материалах (прежде всего в металлах) существенно зависит от физики деформационных процессов в решетке. Разработка таких методов наиболее важна для акустических методов диагностики, которые основаны на записи деформационных процессов в решетке материала. Поэтому задача описания формирования динамического отклика в решетке проводников с возможностью возбуждения электронного газа является принципиально новой фундаментальной задачей.

Впервые разработана физическая модель, которая учитывает воздействие нагретого электронного газа на динамику кристаллической решетки не только через тепловое расширение решетки, но и через дополнительную реакцию, вызванную подвижностью электронов. В этом случае изучаются эффекты возбуждения электронного газа и эффекты электронного сопротивления из-за движения теплового фронта, учитывая взаимодействие с решеткой материала.

В сущности, классическая термоупругость дополняется соотношениями, которые учитывают динамику электронов, как и составляющие их параметры [4]. В основе предлагаемой модели, рассматриваются особенности деформационных процессов около созданных дефектов проводников, подвергнутых лазерному воздействию.

Предлагаемая модель запрограммирована в конечно-элементной системе и протестирована в сравнении с экспериментальными данными. В частности, экспериментальная информация по ультразвуковой диагностики металлов, идентированных по методу Виккерса и Роквелла, представлена в источниках [5-7].

Литература

1. D. A. Indeitsev, Yu. I. Meshcheryakov, A. Yu. Kuchmin, D. S. Vavilov, Multi-scale model of steady-wave shock in medium with relaxation, Acta Mechanica, 2015, V.226, No. 3, pp.917-930.

2. Indeitsev D. A., Skubov D. Y., Vavilov D. S. Problems of Describing Phase Transitions in Solids //Mechanics and Model-Based Control of Advanced Engineering Systems. – Springer Vienna, 2014, – pp. 181-188.
3. L. Jiang, H.L. Tsai,, Improved Two-Temperature Model and its Application in Ultrashort Laser Heating of Metal Films, J. of Heat Transfer, 2005, V.127, No. 10, pp.1167-1173.
4. D.Y. Tzou, J.K. Chen, J.E. Beram, Recent Development of Ultrafast Thermoelasticity, J. of Thermal Stresses, 2005,V.28, No. 6-7, pp.563-594.
5. A.L. Glazov, N.F. Morozov, K.L. Muratikov, The Effect of External Stresses on the Behavior of Photoacoustic Signals Inside Vickers Indenter Marks on a Steel Surface, Tech. Phys. Lett., 2016, Vol. 42, No. 1, pp. 67–70.
6. A.L. Glazov, N.F. Morozov, K.L. Muratikov, Variations of Photoacoustic Signals within the Vickers Indent in Metals under External Stresses by the Examples of Steel and Nanocopper, Physics of the Solid State, 2016, Vol. 58, No. 9, pp. 1735–1743.
7. A.L. Glazov, N.F. Morozov, K.L. Muratikov, Photoacoustic Microscopy of Vickers Indentations in Metals with Piezoelectric Detection, Int. J. Thermophys. 2017, V.38, No.7, pp.113-1-113-13.

## Изучение зарождения дислокаций на границе зерна в ГЦК поликристаллах

Фомин Е.В.
Научный руководитель — д.ф-м.н. Майер А.Е.
ЧелГУ, Челябинск
fomin33312@gmail.com

В данной работе исследуется зарождение дислокаций на границе зерна (ГЗ) в кристаллах алюминия под действием сдвиговой деформации. Для моделирования процесса деформации применяется метод молекулярной динамики с помощью программного пакета LAMMPS[1], где межатомное взаимодействие зайдется потенциалом EAM (embedded atom model)[2].В качестве образцов взяты 12 бикристаллов ($2.25^0$-$40.316^0$) с симметричным углом наклона зерен и 1 монокристалл, кристаллографические направления всех образцов [100] [-110] [001]. Кристаллы содержат от 503520 до 523520 атомов. В исследовании, бикристаллы построены при помощи метода диаграмм Вороного в программном пакете atomsk[3].

Анализ результатов моделирование показывает, что существует 3 типа ГЗ в данном диапазоне углов разориетировки. Первый тип – типичная малоугловая граница зерна, состоящая из периодически расположенных полных дислокаций. Второй тип (среденеугловая ГЗ) можно представить как сплетение дислокаций (из-за сложной структуры ее точно нельзя охарактеризовать как остальные 2 типа). Третий тип – высокоугловая ГЗ, состоящая из периодически расположенных дислокаций Франка. Кроме этого, из полученных данных выделено изменение систем скольжения дислокаций (исходящих с ГЗ) с ростом угла разориентировки.

Для каждого типа ГЗ можно выделить характерные свойства, проявляющиеся во время пластической деформации. К примеру, зарождение дислокаций – в 1 и 3 типе дислокации с границы распространяются в зерна за счет реакций расщепления (например, полная дислокация →дислокация Франка + дислокация Шокли), а во 2 случае происходит излучение растянутых частичных дислокаций с границы без видимых изменений ГЗ. Также, зависимость между углом наклона зерен и плотностью дислокаций имеет немонотонный характер и зависит от структуры ГЗ. Впрочем, проявляется корреляция между касательным напряжением и плотностью дислокаций, что указывает на явную связь приложенных напряжений и зарождения дислокаций на ГЗ.

Суммируя, можно сделать вывод, что возможно описание связи зарождения дислокаций и приложенных напряжений, но нужно учитывать тип ГЗ, энергию границы, изменение

систем скольжения и реакции расщепления дислокаций на границе, если они есть (1 и 2 тип ГЗ). Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственного задания 3.2510.2017/ПЧ.

Литература

1. Plimpton S. Fast Parallel Algorithms for Short-Range Molecular Dynamics // J. Comp. Phys. 1995, V. 117, P. 1-19.
2. Mishin Y., Farkas D., Mehl M.J., and Papaconstantopoulos D.A. Interatomic potentials for monoatomic metals from experimental data and ab initio calculations // Phys. Rev. B 1999, V. 59, P. 3393.
3. Pierre Hirel, Atomsk: A tool for manipulating and converting atomic data files // Comput. Phys. Comm. 2015, V.197, P.212-219.

## Динамические эффекты деформирования пластического слоя между жесткими цилиндрами

Шабайкин Р.Р.
Научный руководитель — профессор, д.ф-м.н. Георгиевский Д.В.
МГУ, Москва
ravi11@live.ru

Рассмотрено течение тонкого идеальнопластичного несжимаемого слоя конечной длинны между сближающимися цилиндрами, где внешний цилиндр неподвижен, а внутренний расширяется с постоянной скоростью. Пластический слой в данном процессе выдавливается в стороны и течёт от плоскости симметрии перпендикулярной оси цилиндров к свободным границам слоя. На поверхностях контакта при этом возникают касательные напряжения. Отыскание решения проводится методом асимптотического интегрирования, в ходе которого возникает 2 безразмерных параметра, один из которых связан с динамическими слагаемыми и равен обратному числу Эйлера, а другой является естественным малым геометрическим параметром, равным отношению толщины слоя к половине его длины. Эти величины принимаются малыми.

Метод заключается в разложении неизвестных функций в системе уравнений пластичности по степеням малого геометрического параметра и последовательного приравнивания коэффициентов при одинаковых степенях правых и левых частей уравнений.

Из анализа уравнений движения получен критерий, позволяющий различать квазистатическую стадию сжатия и динамическую.

Найдены главные члены асимптотик для 2 режимов сдавливания и проведено качественное сравнение с квазистатическим решением: показано изменение эпюры давления с линейной на квадратичную, что говорит об увеличении суммарной силы действующей на поверхность. Данные решения справедливы вдали от плоскости симметрии перпендикулярной оси цилиндров и свободных границ слоя, где необходимо строить другие разложения.

# Численное моделирование процесса перераспределения тепловой энергии в нелинейном двумерном кристалле с треугольной решёткой

Шварёв Н.Г., Старобинский Е.Б.
Научный руководитель — доцент, к.ф-м.н. Кузькин В.А.
СПбПУ, Санкт-Петербург
megameow@mail.ru

В связи с развитием нанотехнологий количественное описание неравновесных тепловых процессов в кристаллах является одной из актуальных проблем современной механики и физики твердого тела. Большой интерес представляют процессы, происходящие в телах при переходе к состоянию термодинамического равновесия. При возникновении неравновесного состояния кинетические энергии теплового движения атомов в разных направлениях могут значительно различаться, вследствие чего кинетическая температура проявляет тензорные свойства [1].

Рассматривается двумерная плотноупакованная треугольная кристаллическая решетка, ближайшие частицы в которой взаимодействуют посредством потенциала Леннард-Джонса. Ячейка периодичности содержит миллион частиц. Начальные перемещения частиц равны нулю. Начальные скорости частиц – независимые случайные векторы с нулевым математическим ожиданием в пределах заданной амплитуды. При проведении расчетов математическое ожидание заменено на усреднение по 100 реализациям.

В качестве величины, характеризующей распределение кинетической энергии (температуры) по пространственным направлениям, используется обезразмеренная разность температур θ, соответствующих движению частиц по взаимно перпендикулярным осям.

Для того чтобы исследовать влияние нелинейности на процесс перераспределения кинетической энергии по направлениям, была проведена серия расчетов с различными значениями амплитуды начальных скоростей. Вследствие чего получено, что на временах порядка нескольких периодов осцилляции величина θ совершает высокочастотные колебания, описываемые гармонической моделью [2]. На больших временах на высокочастотные колебания накладывается медленный процесс, связанный с наличием нелинейности, приводящий к тому, что система стремится к равному распределению энергии по пространственным направлениям (θ стремится к нулю). Скорость данного процесса зависит от величины начальной температуры системы. Чем она больше, тем быстрее система стремится к равному распределению энергии по пространственным направлениям. При этом на больших временах изменение начальной температуры соответствует изменению масштаба по времени функции θ по следующему закону подобия: $\theta 1(t) = \theta 2(t * T1/T2)$, где T1 и T2 – значения начальной температуры системы.

Быстрый процесс, соответствующий гармонической модели, при окончании высокочастотных колебаний через несколько периодов осцилляции аппроксимируется прямой $\theta = ¼$. Выделенный чисто медленный процесс, связанный с наличием нелинейности, имеет аппроксимацию в виде степенной функции времени, также подчиняющейся закону подобия.

Таким образом, было получено, что нелинейный идеальный кристалл с треугольной решеткой стремится к равному распределению кинетической энергии по пространственным направлениям. Скорость данного переходного процесса зависит от величины начальной температуры системы. Влияние нелинейности сводится к изменению масштаба по времени функции, описывающий переходный процесс. Также были выделены и аппроксимированы быстрый и медленный процессы.

Литература

1. B.L. Holian, W.G. Hoover, B. Moran, G.K. Straub, Shock-wave structure via nonequilibrium molecular dynamics and Navier-Stokes continuum mechanics. Phys. Rev. A, 22, 2798 (1980).

2. В.А. Кузькин, А.М. Кривцов. Аналитическое описание переходных тепловых процессов в гармонических кристаллах. Физика твердого тела, том 59, вып. 5, 1023-1034 (2017).

## Оптимизация технологического процесса изотермической прошивки патрубков с наклонным фланцем с помощью метода верхних оценок

Шелест Д.О.
Научный руководитель — профессор, д.т.н. Черняев А.В.
ТулГУ, Тула
denisabanosimov@mail.ru

Интенсивное развитие авиационной промышленности актуализирует задачи получения сложнопрофильных металлических деталей наиболее рациональными и эффективными методами обработки металлов. Патрубки с различными углами наклона фланца имеют широкое применение в авиастроении. Наиболее технологичными и производительными операциями для получения изделий подобной конфигурации являются операции с использованием обработки металлов давлением (ОМД). В частности, схема, сочетающая в себе пробивку, формовку, вытяжку и выдавливание цилиндрической стенки патрубка.

На стадии обратного выдавливания, т.е. формирования цилиндрической стенки патрубка и калибровки внутреннего отверстия посредством выбора диаметра прошивного пуансона, имеется ряд особенностей, учитывая которые, можно существенно оптимизировать технологический процесс изотермической прошивки патрубков с наклонным фланцем. Для оценки степени влияния геометрических и скоростно-силовых параметров прошивки необходимо создать математическую модель прошивки патрубка с заданными параметрами, построить графические зависимости, а также найти оптимумы.

Наиболее предпочтительным для создания математической модели выдавливания на наш взгляд является метод верхней оценки. Он отличается сравнительной простотой решения, а также достаточной точностью получаемых зависимостей, что позволяет нам решать различные задачи по оптимизации технологических процессов обработки металлов давлением. В работе при помощи решения полученного с применением метода верхних оценок были найдены закономерности изменения силовых параметров и повреждаемости заготовки от геометрических, скоростно-силовых и других факторов, на основе этих уравнений построены графические зависимости (в программном комплексе MathCAD). Выявлены оптимальные скорости движения инструмента и геометрические параметры, в первую очередь угол конусности прошивного пуансона и редукция, т.е. изменение диаметров до и после прошивки. Установлен оптимальный диапазон угла конусности пуансона, который составляет от 7 до 16 градусов.

Дальнейшая работа будет направлена на систематизацию полученных данных. На данный момент осуществляется анализ повреждаемости заготовки в процессе прошивки патрубков.

# Разработка технологии получения магнитной жидкости с оптимальными свойствами для магнитно-жидкостных уплотнителей

Шешенин М.А.
Научный руководитель — Столяров И.В.
СПТ им. Б.Г. Музрукова, Саров
msheshenin@inbox.ru

В данной работе рассмотрены механические и химические способы получения магнитных жидкостей, исследованы физико-химические способы получения магнитных жидкостей с оптимальными свойствами: стабильностью или увеличением значения магнитной индукции в жидкости при наличии внешнего магнитного поля с увеличением температуры.

Практическая ценность работы – разработан технологический процесс синтеза магнитной жидкости на водной основе с объемной концентрацией твердой фазы (сТ) 4%, которая может быть применена в магнитножидкостных уплотнителях, работающих в неоднородном магнитном поле при температурных нагрузках в пределах от 30оС до 100о, которые могут быть использованы в авиационной и ракетно-космической технике.

Выбор данной жидкости определяется оптимальным характером изменения магнитной индукции (в сравнении с другими магнитными жидкостями на водной основе с объемной концентрацией твердой фазы сТ 2%, 6% и 8% и промышленной магнитной жидкостью на основе керосина). После диспергирования на ультразвуковом диспергаторе были также исследованы размеры частиц порошка в жидкости и был произведен нагрев жидкостей до 1000С с последующим повторным исследованием размеров частиц.

Данное исследование также подтвердило выбор магнитной жидкости на водной основе с сТ=4%.

Для выявления «оптимальной» жидкости был применен стандартный метод конденсации при осаждении магнетита щелочью из водных растворов солей двух- и трехвалентного железа с нашими изменениями. Были получены жидкости, отличающиеся не только размером частиц, но также их объемной концентрацией (сТ 2%, 4%, 6% и 8%).

Для сравнения была использована промышленная магнитная жидкость на основе керосина с дисперсными магнетитовыми частицами и олеиновой кислотой в качестве стабилизатора с сТ=5%.

Все пробы магнитных жидкостей были подвергнуты металлографическому исследованию с целью измерения размеров частиц на оптическом микроскопе «Axiovert 200 MAT» при увеличении х1000 с помощью системы анализа изображений «ВидеоТесТ – Размер 5.0». Были исследованы размеры частиц в магнитных жидкостях в исходном состоянии и после нагрева жидкостей до 1000С. Было произведено диспергирование на ультразвуковом диспергаторе УЗНД – 2Т и исследованы размеры частиц порошка в жидкости, после чего был произведен нагрев жидкостей до 1000С и повторное исследование размеров частиц. Все проведенные исследования подтвердили правильность выбора магнитной жидкости с оптимальными свойствами для данной задачи с сТ=4%.

Составлен бизнес-план производства данной магнитной жидкости с объемной концентрацией твердой фазы 4% на базе производственных мощностей ГБПОУ СПТ им. Б.Г. Музрукова. Исходя из проведенного экономического исследования и анализа, можно сделать вывод, что данный проект является прибыльным, т.к. уровень рентабельности в течение одного года равен 54% при норме от 15 до 50%.

# Методика измерения деформаций проволочной основы материала МР при испытаниях на разрыв

Шипунов В.В., Десюкевич К.Ю.
Научный руководитель — Давыдов Д.П.
СНИУ им. С.П. Королёва, Самара
happypandarus3@gmail.com

В современной ракетно-космической технике широко применяются разнообразные изделия из материала МР (металлический аналог резины).

Материал МР представляет собой однородную упругопористую массу, получаемую холодным прессованием определённым способом уложенной, растянутой и дозированной по весу металлической проволочной спирали. От упругопластических характеристик проволоки зависят свойства готовых деталей из МР.

Механические свойства проволочной основы мало изучены. Знание этих свойств позволит изучить процессы навивки и прессования материала МР на принципиально новом уровне с применением современных средств компьютерного математического моделирования, таких как ANSYS и LS-DYNA.

Механические характеристики планируется исследовать путем проведения разрывных испытаний образцов проволоки с получением диаграмм растяжения в координатах «напряжение – деформация». Для этого предлагается использовать универсальную испытательную установку типа Galdabini Quasar 25. Для корректного закрепления проволочных образцов в процессе испытаний были разработаны [1] специальные зажимы.

Следует отметить, что в настоящее время не существует датчиков, позволяющих измерять деформацию проволочного образца на рабочем участке l_0. Средства, применяемые для измерения деформации стандартных гладких цилиндрических образцов, такие, как подвесные экстензометры невозможно закрепить на образце в силу его низкой изгибной жёсткости. Использование тензорезисторов ограниченно в связи с малыми диаметрами проволоки, применяемой для изготовления материала МР (0,05-0,3 мм). Решением проблемы может стать датчик измерения деформации, работа которого основана на оптоэлектронном методе. Суть метода заключается в связи выходного напряжения со световым потоком, падающим на датчик. Пример использования этого метода в целях автоматизированного контроля параметров проволочной спирали в статье [2].

В настоящей работе впервые предлагается методика измерения деформаций проволочной основы материала МР при испытаниях на разрыв. Проволока устанавливается между двумя зажимами, один из которых неподвижен, а второй перемещается вверх, вызывая её растяжение. На образце закреплены две пластины-флажка, определяющие его измерительную базу l_0. Они смещаются при растяжении вместе с проволокой. Датчик деформации состоит из двух пар оптоэлектронных устройств, каждая из которых содержит фотодиод – источник инфракрасного излучения и фототранзистор (фотоэлемент) – приёмник излучения. Наличие двух датчиков, верхнего и нижнего, позволяет определять удлинение базы образца проволоки. В начальный момент времени оба флажка частично перекрывают фотоэлементы. По ходу испытания они смещаются вверх, перекрывая всё большую площадь фотоэлемента и уменьшая фотопоток. При снижении фотопотока падает напряжение на фототранзисторе. Для используемого типа датчика зависимость напряжения от фотопотока линейная, что значительно упрощает измерение величины деформации. Выполнив тарировку датчиков, можно напрямую связать напряжение на фототранзисторе с величиной удлинения проволоки:

$y=k\Delta U$,

где $\Delta U$ – изменение напряжения на фототранзисторе, y – величина смещения флажка, k – тарировочный коэффициент. Тогда относительную деформацию проволочного образца можно представить в следующем виде:

$\varepsilon=\Delta l/l_0 =(y_2-y_1)/l_0 =(k(\Delta U_2-[\Delta U]_1))/l_0$,

где $\Delta l$ – удлинение базы $l_0$, $[\Delta U]_1$, $[\Delta U]_2$ – изменение напряжения на фототранзисторах при испытании, $\varepsilon$ – относительная деформация проволочного образца.

Для разработки конструкции датчика деформации проволоки была выбрана программная среда твердотельного объёмного моделирования SolidWorks. Применение параметризации позволило создать легко изменяемую цифровую трехмерную модель и рассмотреть множество различных конструктивных исполнений.

Литература

1. Десюкевич, К.Ю., Шипунов, В.В. Проектирование установки для исследований механических свойств проволочной основы материала МР // Студенческая научно-техническая конференция «Лукачёвские чтения – 2017». – Самарский университет, 2017. – 76с.

2. Варжицкий, Л.А., Волкова, Т.В., Чертыковцев, И.В. Разработка устройств для автоматизированного контроля параметров проволочной спирали // Вестник транспорта Поволжья. Самара, 2016. С. 92-97.

## Создание новой арматурной сетки с квадратными ячейками

Якимова Е.И.
Научный руководитель — доцент, д.т.н. Лебедев В.В.
МГСУ, Мытищинский филиал, Мытищи
liz652330@yandex.ru

Задача об изготовлении новой арматурной сетки с квадратными облегчёнными ячейками появилась после исследования различного типа перекрытий в строительных конструкциях [1]. При проектировании перекрытий надо учитывать не только прочность конструкции, но и минимизировать массу и расход строительных материалов [2,3]. Такая задача оказалась актуальной не только для строительства, но и особенно для авиационно-космической техники.

Даже самая простая задача о перекрытии квадратной области балками имеет далеко нетривиальное решение в виде двух диагоналей. Обобщением задачи арматурного обхода является прямоугольная область. Задачи для перекрытия квадратной и прямоугольной областей были решены строго аналитически методами математического анализа. Была записана целевая функция – общая длина балок перекрытия квадратной или прямоугольной области, применено необходимое условие экстремума, проверено достаточное условие минимума и получен, казалось бы, тривиальный результат о рациональности диагонального перекрытия. Однако этот результат был использован в качестве исходных данных для расчёта проигрыша в длине перекрытия при отступе от рациональной схемы диагонального перекрытия. Полученные аналитические результаты были проверены численно с помощью программы MathCAD-14.

Эти графики показали, что для квадрата проигрыш в массе при арматурном обходе одинаков при отступе от центра в любом направлении. Но для прямоугольника, например, с удлинением 10:1 дело обстоит иначе: по ширине прямоугольника точку сходимости арматуры можно перемещать как угодно, вплоть до касания длинной стороны, а по длине – очень ограниченно, не более чем на четверть длинной стороны, потому что потом масса арматурного перекрытия будет резко возрастать, значительно утяжеляя конструкцию.

Появилась задача о существовании других схем армирования квадратной области. В геометрии известна задача Штейнера о соединении четырёх вершин квадрата самой

короткой линией [4]. Эту задачу можно решить методами математического анализа только при условии, что общий вид соединительной линии известен априорно, например, четыре сходящихся отрезка, как в рассмотренных уже случаях. Но почему четыре отрезка? Штейнер доказал, что пять отрезков соединяют четыре вершины квадрата по более короткому пути, чем четыре. Однако вопрос определения общего вида соединительной линии остался открытым. А.И.Драцкая предложила определять вид оптимальной соединительной линии по аналогии с мыльными плёнками, натянутыми на проволочный кубический каркас. Квадратная ячейка Штейнера на 3,5% легче традиционной элементарной ячейки-крестика, применяемой в строительстве или в конструкции космических аппаратов, например, в тканевых материалах.

Ячейка Штейнера обладает свойством анизотропии прочности вследствие нарушения диагональной симметрии по сравнению с традиционной ячейкой-крестиком. Свойство анизотропии прочности ячейки Штейнера позволяет создавать множество вариантов арматурных сеток с такими ячейками – все они будут на 3,5% легче традиционных арматурных сеток или тканей с распространёнными квадратными ячейками.

Дальнейшее исследование квадратных ячеек Штейнера связано с изучением их инерционных свойств, построением эллипса инерции для единичной ячейки и комбинации различных соединений анизотропных ячеек и расчётом прочности предлагаемой новой облегчённой армированной конструкции.

Литература

1. Марутян А.С., Оробинская В.Н. Трехгранные фермы покрытий (перекрытий) и оптимизация их высот // Вестник МГСУ: Научно-технический журнал по строительству и архитектуре. – Том 12. Вып. 2 (101). - DOI: 10.22227/1997-0935.2017.2.-М.: ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ». - С.172.

2. Якимова Е.И. Минимизация силового арматурного перекрытия прямоугольной формы / Строительство — формирование среды жизнедеятельности. - Электронный ресурс: сборник трудов XX Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых (26–28 апреля 2017 г., Москва). - М-во образования и науки Рос. Федерации, Нац. исследоват. Моск. гос. строит. ун-т. - Электрон. дан. и прогр. (73,7 Мб). — Москва : Изд-во Моск. гос. строит. Ун-та, 2017. — Режим доступа: http://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkrdostupa/ — Загл. с титул. экрана. - ISBN 978-5-7264-1660-1.- С.420-424.

3. Драцкая А.И., Скворцова А.А., Якимова Е.И. Оптимизация арматурного перекрытия в строительных конструкциях / Сборник тезисов участников форума «Наука будущего – наука молодых». – Нижний Новгород, 12-15 сентября 2017, в двух томах. – Том 1. – 295 с.: Ил. – Секция 4: «Математика и механика». – С.187-189. – ISBN 978-5-9907236-7-2; 978-5-9907236-8-9. – Электронный ресурс: http://sfy-conf.ru/

4. Протасов В.Ю. Максимумы и минимумы в геометрии. – Библиотека «Математическое просвещение» М.: Изд-во Московского центра непрерывного математического образования, 2005. – 56 с. – Электронный ресурс: https://www.mccme.ru/free-books/mmmf-lectures/book.31.pdf

## Взаимодействие инструмента с вязкоупругой тканью

Яковенко А.А.
Научный руководитель — академик, д.ф-м.н. Горячева И.Г.
МФТИ, Долгопрудный
anastasiya.yakovenko@phystech.edu

Рассмотрена проблема взаимодействия штампа с однородной и неоднородной средой, обладающей релаксационными свойствами. Для изучения механических процессов,

возникающих при данном взаимодействии, решаются контактные задачи о внедрении сферического индентора с постоянной скоростью в однородное вязкоупругое полупространство и в неоднородное многослойное основание, включающее в себя вязкоупругий слой.

Данная проблема является актуальной в медицинской сфере, так как существует широкий класс процедур, сопровождаемых взаимодействием медицинских инструментов с телом человека. Например, при проведении хирургических операций, диагностических процедур, массажа происходит внедрение инструментов разной формы в мягкую биологическую ткань. Поскольку данные процессы преследуют совершенно различные цели, необходимо иметь полное представление о возникающих в тканях напряжениях. Построенная в данной работе модель позволяет исследовать изменения контактных давлений и напряжений в тканях при их деформировании. А так как мышечная ткань имеет релаксационные свойства, то рассмотрение вязкоупругих моделей имеет практическое значение.

В случае внедрения сферического индентора в вязкоупругое полупространство использовался подход Радока, при котором производится замена упругих постоянных в известном упругом решении соответствующими интегральными операторами из определяющих соотношений вязкоупругости. В качестве известного упругого решения бралось решение Герца. Так как внедрение происходит с постоянной скоростью, то, следовательно, задана зависимость области контакта от времени. Это позволяет получить зависимости от времени нагрузки, прилагаемой к инструменту, и максимального давления в центре области контакта. При этом в рассмотрение бралось два вида ядер релаксации в общем виде: экспоненциальное ядро, и ядро Абеля. Затем также проанализировался и частный случай, ядро Кельвина-Фойгта. Полученные результаты позволяют также оценить влияние скорости внедрения индентора на изменение нагрузок.

В случае неоднородного многослойного основания использовались упрощенные модели: для упругого слоя – модель Винклера, для вязкоупругого – модель Кельвина-Фойгта. В частности, установлено, что при внедрении с постоянной скоростью сферического индентора в двухслойную среду, состоящую из поверхностного упругого слоя, лежащего на вязкоупругом, давления под индентором возрастают со временем, при этом растет и нагрузка, действующая на индентор. Наличие верхнего упругого слоя определенной толщины накладывает ограничение на величину внедрения (или время). Полученные временные зависимости нагрузок и контактных давлений были сравнены с результатами, полученными для однородного вязкоупругого основания, моделируемого сплошной средой.

Полученные результаты позволяют оценить прилагаемые нагрузки и контактные давления, возникающие в ткани человека при взаимодействии с инструментом, для разных скоростей внедрения. Также они дают возможность выбрать подходящую модель для описания ткани в зависимости от цели исследования и характеристик исследуемой биологической ткани.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 16-58-52033).

## Вытяжка изделий с широким фланцем через радиальную матрицу

Яковлев С.С.
Научный руководитель — доцент, д.т.н. Ларин С.Н.
ТулГУ, Тула
suleea@yandex.ru

Процесс вытяжки является очень распространенной операцией листовой штамповки, с помощью которой получают огромное количество наименование изделий, в основном представляющих собой цилиндр с различной формой дна и фланца. Данный процесс в связи

с распространённостью хорошо изучен, однако в литературе мало внимания уделяется учету механических и физических свойств металла на устойчивое протекание процесса. В данной работе представлена на рассмотрение первая вытяжка с прижимом фланца через матрицу с радиальной формой рабочей кромки листового материала, характеризующегося анизотропными свойствами. В качестве допущений при расчетах мы принимаем, что материал несжимаем, проявляет анизотропные свойства, изотропно упрочняется. Для описания поведения материала актуально условие текучести Мизеса-Хилла и ассоциированный закон течения. При расчетах считаем, что операция вытяжки происходит в условиях плоского напряженного состояния. Для наших условий деформирования принимается справедливость реализации закона трения Кулона на границах заготовки и инструмента.

При моделировании данного процесса пользуемся способом, основанном на одновременном решении приближенных дифференциальных уравнений равновесия и условий текучести, который учитывает сопряжения на контактных границах и изменение течения материала. Перед расчетом очаг деформации делим на несколько участков. Анализ исследуемой операции проводим для начальной стадии вытяжки и стадии, при которой происходит совпадение центра закругления пуансона с верхней кромкой матрицы.

Напряженно-деформированное состояние изделия исследуем с разбивкой очага деформации на три характерных участка: первый участок находится в части заготовки, который лежит на поверхности матрицы и ограничен торцом заготовки с одной стороны; второй участок включает входную кромку матрицы и лимитируется координатами и текущим углом охвата заготовкой тороидальной поверхности матрицы; третий участок находится между входной поверхностью конуса матрицы и кромкой пуансона. По результатам моделирования были получены соотношения, позволяющие проанализировать влияние таких параметров, как степень деформации, размеры инструмента, параметры трения и давление прижима на силу вытяжки с фланцем для разных материалов и размеров заготовок.

Получены зависимости, позволяющие оценить изменение относительной величины силы при вытяжке от относительной величины радиуса матрицы, коэффициента вытяжки, коэффициента трения и относительной величины давления прижима при постоянных величинах других характеристик для стали, латуни и алюминиевого сплава.

Полученные результаты можно использовать как рекомендации при проектировании технологических процессов.

Работа выполнена в рамках грантов РФФИ № 16-48-710014 и гранта администрации Тульской области.

## Расчёт морфологических характеристик кристаллических структур в переохлажденной металлической пленке

Яруллин Д.Т.
Научный руководитель — доцент, к.ф-м.н. Галимзянов Б.Н.
КФУ, Казань
Dinar96@list.ru

В настоящее время, изучение и количественная характеризация начальных этапов структурно-фазовых трансформаций является одним из актуальных задач физики конденсированного состояния. Большой интерес к этой задаче вызван отсутствием понимания морфологии формирующихся структур на этапе зарождения первых очагов новой фазы. Одной из причин является малый размер зародышей и высокая кривизна межфазной границы, что существенно осложняет их детектирование с помощью экспериментальных методов и затрудняет проведение теоретического описания. С другой

стороны, возникает необходимость в непрерывной «слежке» за ростом (изменением) размера зародыша во времени, что сложно осуществить экспериментально. Использование методов компьютерного моделирования позволяет избежать указанных недостатков.

В настоящей работе рассматривается процесс кристаллизации переохлажденной жидкости, которая представляет собой тонкую пленку. Взаимодействие атомов задается через потенциал Джугутова, который позволяет эффективным образом воспроизвести свойства металлических систем. Основное внимание уделяется оценке морфологии формирующихся кристаллических структур при различных уровнях переохлаждения системы. Нами показано, что уменьшение температуры системы (или увеличение степени переохлаждения) приводит к формированию кристаллических зародышей, характеризующихся несферической формой. Обнаружено, что вблизи и ниже температуры стеклования происходит резкое замедление роста количества формирующихся зародышей. Полученные результаты сравниваются с доступными экспериментальными данными и результатами численного моделирования.

# АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ


Son JIN ..... 152
Абдульминов А.А. ..... 252
Абрамов П.В. ..... 253
Абрашкин Д.А. ..... 77
Авдеева Н.А. ..... 78
Авдюхина В.М. ..... 415
Аверина А.Е. ..... 299
Агапов И.Г. ..... 299
Агафонов М.В. ..... 229
Агафонова Д.В. ..... 153
Агишев А.Р. ..... 8
Адаменко Н.А. ..... 292, 308
Азиков Н.С. ..... 32
Аккужин Н.Д. ..... 350
Аккуратнова А.С. ..... 366
Александровская Л.Н. ..... 186
Алексеев Е.Р. ..... 12
Алексеева Н.Н. ..... 26, 135
Алендарь А.Д. ..... 227
Аленин С.В. ..... 35
Аликина А.С. ..... 154, 222
Алифанов О.М. ..... 36, 44
Алпаткина Ю.О. ..... 79
Алпатов Р.С. ..... 43
Альшакова Е.А. ..... 239
Альшакова Е.Л. ..... 239
Амирова Л.М. ..... 304
Ан Д.А. ..... 292
Андрианова К.А. ..... 303
Андросович И.В. ..... 155
Аносов Е.А. ..... 110
Антипов А.Н. ..... 254
Антипова А.М. ..... 45
Антонов А.М. ..... 367
Антонов Д.О. ..... 322, 338
Арсланов А.А. ..... 156, 160
Артамонов Б.Л. ..... 21
Артамонова Н.В. ..... 255
Арустомян В.А. ..... 45
Архипов С.В. ..... 46
Астапов В.Ю. ..... 171
Астахов М.О. ..... 111
Афанасьев В.П. ..... 207
Афанасьева О.В. ..... 112
Ахматова А.А. ..... 307
Ахметов С.Н. ..... 16, 32
Бабаевский П.Г. ..... 306, 310
Бабарыкин В.А. ..... 9
Бабин С.В. ..... 67, 264
Бажанов А.В. ..... 172
Баимова Ю.А. ..... 414
Балык В.М. ..... 17, 23, 37, 38
Барабанова О.А. ..... 353
Баранов М.А. ..... 367
Баранова И.С. ..... 60
Баринов А.В. ..... 47
Барсегян О.С. ..... 368
Баско А.С. ..... 80
БАсков Ф.А. ..... 255
Батиков А.А. ..... 48
Батраков В.В. ..... 157
Батраков М.П. ..... 326
Бачеева А.В. ..... 161, 354
Беззаметнова Д.М. ..... 157
Безъязычный В.Ф. ..... 204
Беклемишев Н.Н. ..... 383, 410
Беличенко С.С. ..... 230, 236
Белкин В.С. ..... 323
Белов А.И. ..... 49
Белов С.П. ..... 158
Белоусов В.Б. ..... 324
Белых С.В. ..... 235
Беляев А.В. ..... 325, 326
Береговой В.Г. ..... 45, 50, 71, 73
Бережной Д.В. ..... 253
Бецофен С.Я. ..... 330, 340
Бидеева М.А. ..... 50
Блатиков Г.А. ..... 68, 146
Бобкова А.В. ..... 272
Бобронников В.Т. ..... 60
Бобрышев Б.Л. ..... 263
Бобыкин В.В. ..... 317
Богач Е.С. ..... 86
Бойцов А.Г. ..... 152, 183, 188, 192

Боль А.В. .....113
Бондаренко Д.О. .....327
Борисов А.А. .....292, 329
Бородин И.Д. .....17
Бородулин П.О. .....272
Борунова Т.И. .....256
Босалыго К.А. .....257
Бостенков А.А. .....231
Бриккель Д.М. .....369
Бродский А.В. .....115, 120, 137, 140
Бродский М.Ю. .....43
Булыгин М.Л. .....50
Бурлак Е.П. .....80
Бурмистров М.Д. .....51
Буртасова М.В. .....370
Буряковская А.А. .....334
Бут А.Б. .....70
Бухалов В.И. .....371
Бухаров С.В. .....298, 301, 309, 314
Быстрянский А.А. .....159
Вагапов Т.И. .....328
Варады Г.К. .....17
Варданян Е.С. .....82
Варфоломеев М.С. .....275
Васильев Д.Д. .....258
Васильев Л.А. .....52
Васимова И.Н. .....258
Васькова Е.А. .....82
Вахрушева Л.С. .....83
Ведищев А.С. .....84
Вей Хлэйн У .....20, 28, 41
Викулин Н.А. .....18
Винничук С.В. .....19
Виноградов Р.Е. .....292, 329
Вистяж П.С. .....159
Владимиров А.В. .....175
Власенко А.Н. .....281
Власов И.В. .....127
Вовченко С.В. .....201
Войцицкая Э.П. .....23
Волгушев А.А. .....260
Волегов П.С. .....367, 375, 379, 397, 400, 406, 407, 424
Волков А.В. .....372
Волков Д.И. .....165, 209
Волков И.В. .....20, 28, 41
Волков М.А. .....372
Волосатова Т.М. .....55
Воробьев А.Л. .....10
Воронин С.В. .....210, 351, 361, 396
Вулпе М.Н. .....156, 160, 185
Гавриков А.Г. .....351
Гаджибеков Т.А. .....373
Галимзянов Б.Н. .....442
Галимов Э.Р. .....315, 429
Галкин В.И. .....256, 274
Галкин К.А. .....260
Галкина Е.Е. .....76, 83, 102
Гандилян Д.В. .....374
Ганзен М.А. .....163
Гапоненко И.В. .....294
Гафиятуллина С.И. .....295
Гвоздарев Р.С. .....222
Гвоздева М.А. .....86
Гвоздева О.Н. .....337
Гвоздкова Ю.Д. .....87
Георгиевский Д.В. .....423, 434
Герасимов Р.М. .....375
Геращенков А.А. .....261
Герман М.А. .....161
Гинзбург И.Б. .....112, 144, 147
Глинкин С.Ю. .....20
Глухов В.Д. .....114
Голиков В.А. .....163
Голоднов Д.А. .....88
Голомазов А.В. .....232
Гончар А.Г. .....24, 34, 48
Гончаров В.В. .....262
Горбачев С.И. .....82
Гордеев И.С. .....377
Гордеева М.И. .....330
Городцов В.А. .....372
Горупай Е.В. .....37
Горчаков С.Ю. .....11
Горячева И.Г. .....401, 440
Грабовский И.И. .....53
Графкина М.В. .....118
Грачев М.В. .....224
Грачёва Н.А. .....377
Грибкова Л.А. .....163

Грицай О.Ю. ..... 234
Гришанина Т.В. ..... 65
Грязев А.С. ..... 207
Губарев Н.И. ..... 164
Гулин В.В. ..... 378
Гумницкая О.В. ..... 263
Гуреев И.А. ..... 296
Гусев Д.Е. ..... 292, 329
Гусев Е.В. ..... 143, 150
Гусейнов А.Б. ..... 16, 31
Гуткин М.Ю. ..... 390, 392
Гущин Г.А. ..... 54
Давлятшин Р.П. ..... 379
Давыденко Л.В. ..... 334
Давыдов Д.П. ..... 438
Давыдов П.К. ..... 21
Давыдов С.А. ..... 380
Двинянинова Л.В. ..... 165
Демин Г.Р. ..... 23
Демин Д.В. ..... 264
Демина Т.С. ..... 305, 312
Демьянова А.С. ..... 11
Деревягин С.А. ..... 115
Десюкевич К.Ю. ..... 438
Джабаров А.В. ..... 345
Дзгоев Т.Р. ..... 166
Дзядзько А.В. ..... 23
Дикуша А.А. ..... 265
Добрянский В.Н. ..... 381
Довгань Д.Ю. ..... 167
Дорофеев В.С. ..... 55
Дорофеева А.Н. ..... 297
Драгун Ю.В. ..... 116
Драницина Е.А. ..... 168
Дугин Д.С. ..... 170
Дудин М.А. ..... 118
Дудкин К.К. ..... 44
Дудков К.В. ..... 171
Дулин В.В. ..... 123
Дюстер А.А. ..... 24
Дякин Д.И. ..... 119
Дятлов А.В. ..... 265
Егоров П.А. ..... 235
Егоров Т.В. ..... 172
Егорова Ю.Б. ..... 363, 364
Егошин Е.О. ..... 25
Елисейкин Е.И. ..... 173
Ельников Р.В. ..... 11
Епанешникова И.К. ..... 154
Еремина Е.К. ..... 84
Ермакова Н.О. ..... 89
Ерофеев В.И. .....367, 369, 416
Ершова А.О. ..... 142
Ефремов В.А. .....142, 378
Жаров М.В. .....252, 258
Железнякова Ю.С. ..... 159
Жемаев А.А. ..... 174
Жигалова А.И. ..... 382
Жидович А.О. .....331, 337
Жукова С.А. ..... 191
Журбина Е.В. .....332, 346
Загаровский А.А. ..... 383
Заговорчев В.А. .....114, 125
Загребин В.С. ..... 236
Закиров А.Ю. ..... 56
Заковряшин А.И. ..... 64
Закусилов В.П. ..... 148
Запалова А.В. ..... 329
Заряда К.Ю. ..... 175
Захаренко А.Д. ..... 57
Захаров А.С. ..... 353
Звонов С.Ю. ..... 359
Земляная В.А. ..... 196
Земсков А.В. ..... 380
Земцова Я.С. ..... 334
Зинин А.С. ..... 428
Золотухин А.А. ..... 176
Золотухина Д.А. ..... 177
Зотов А.А. .....26, 120
Зубко И.Ю. ..... 408
Зуев К.В. ..... 298
Ибатуллин И.М. ..... 295
Иванов А.Е. .....331, 335, 347
Иванов Д.А. ..... 350
Иванов Н.А. .....267, 269
Иванов С.И. ..... 384
Иванова А.П. ..... 178
Игнатенко П.П. ..... 121
Игнатов Д.О. ..... 268
Игнатов М.П. ..... 199

Игушева Л.А. .....385
Идрисов Д.М. .....374, 386, 431
Изгагина К.А. .....237
Ильин В.В. .....57
Ильинская О.И. .....200, 203, 328
Ильченко П.А. .....179
Индейцев Д.А. .....431
Ипатова Е.С. .....33
Исаев И.М. .....180
Иутин Р.В. .....336
Кабанов Б.И. .....268
Кабешов М.А. .....229
Кавченко Е.В. .....331, 335
Калачев О.Н. .....173, 223, 248
Калашников А.С. .....360
Калинина Д.М. .....267, 269
Калпина Н.Ю. .....80
Кальмин В.В. .....238
Калягин М.Ю. .....39
Камалов А.Н. .....295
Канг Джимоон .....328
Карнаухов С.Д. .....26
Карпов С.В. .....122
Карпухина Г.В. .....181
Картавский Д.В. .....123
Картавцев А.С. .....182
Касаткин В.Г. ..... 8
Каспарова Е.А. .....387
Касымова Е.А. .....337, 347
Качалова И.В. .....159
Кианианфар М.М. .....183
Киньзякаева Р.А. .....271
Кипин И.А. .....272
Киреев В.А. .....29
Кириллин А.В. .....170, 174, 178, 180, 194, 229, 231, 238, 242, 243, 249, 250
Кириллов С.А. .....58
Кирякин А.А. .....181
Клепинина К.Д. .....90
Клесарева М.В. .....91
Кобзев М.С. .....299
Кобзева И.Н. .....92
Ковалев Ф.А. .....59
Ковалевич М.В. .....158, 245
Козлов В.В. .....275
Козлов Н.А. .....313
Колганов Д.А. .....184
Колесник С.А. .....419
Колесников А.В. .....142, 149
Колесников А.Ф. .....426
Колесников Д.Н. .....160, 185
Коломенцев А.И. .....96
Колпачков Е.Д. .....299
Кольцова А.В. .....186
Комаров Р.С. .....273, 356
Комарова Е.С. .....239
Комарова М.А. .....390
Комолова Н.С. .....96, 124
Кондаков И.Н. .....186
Конкевич В.Ю. .....278, 279
Кононова И.С. .....364
Константинова Е.П. .....93
Корепанова А.А. .....76
Корешков А.В. .....188
Коркина Е.С. .....26
Корнев Ю.В. .....421
Королев А.П. .....301
Коротун В.Л. .....316
Корябочкина А.А. .....125
Косенко П.К. .....189
Коссый И.А. .....86
Котлярова Н.Ю. .....197
Котова А.В. .....94
Кравцов С.Б. .....226
Кравченко М.Ю. .....390
Крапивкин Р.В. .....190
Красницкий С.А. .....390, 392
Крит Б.Л. .....323, 355
Круглов Е.П. .....202
Крупин В.В. .....191
Крутиков П.В. .....393
Крылов А.А. .....136, 141, 142
Кубатина Е.П. .....273
Кубрин В.И. .....197, 198
Кудрявцев А.А. .....431
Кудрявцев А.В. .....240
Кузина С.М. .....274
Кузнецов С.В. .....373, 404
Кузькин В.А. .....435

Кузьменко Т.А. ..... 95
Кулагин А.А. ..... 338
Кулагина А.М..... 96, 124
Куликов С.Н. ..... 240
Кулябко Л.С. ..... 302
Кумаров Р.А. ..... 136
Куприков М.Ю.....234, 237, 241
Курасбедиани Р.Г. ..... 11
Курбанов Я. ..... 27
Курилович С.В. ..... 192
Курицына В.В. .....189, 195, 225
Курмазенко Э.А. ..... 84, 108
Курмашева Л.Р. ..... 303
Куртаева Ф.Н. ..... 168
Курынцев С.В.....156, 160, 185, 336
Кусова В.Р. ..... 60, 63
Кыдралиева К.А. ..... 302
Кыласов М.Я. ..... 142
Лабутин А.А. ..... 267
Лаврентьев С.Ю. ..... 394
Ламзин В.А. .....11, 13, 45
Лаптев А.Б. ..... 299
Ларин С.Н. .....366, 393, 399, 441
Ларина К.А. ..... 126
Ларионов М.Д. ..... 339
Лат Тун Мин ..... 28
Лаценова Л.Р. ..... 127
Лебедев В.В. .....382, 402, 439
Лебедев М.А. ..... 340
Ледовских Д.С..... 395
Ледяев М.Е. ..... 396
Ленковец А.С. ..... 269
Лепешкин А.Р. ..... 163, 182
Лигачев А.Е. ..... 167
Лим Е.В..... 337, 341
Лисовенко Д.С. ..... 390
Литвиненко Е.О. ..... 11
Лодянова В.И. ..... 193
Лоевец Д.А. ..... 397
Лозован А.А. .....267, 269, 273, 282
Локтева Н.А..... 384
Луканин М.Ю..... 12
Лукин А.В..... 398
Лукьянов С.Д. ..... 129
Людомир А.В. ..... 60
Лямина Е.А.....374, 386, 431
Ляховецкий М.А. ..... 345
Магсумова А.Ф. .....295, 307
Мадиярова Г.М. ..... 304
Майгуров М.В. ..... 129
Майер А.Е. .....377, 433
Майоров И.А. ..... 342
Макаров Ф.В. .....161, 341, 346
Макарьянц Г.М. ..... 35
Макашов А.А. ..... 130
Малофеев В.Б. ..... 62
Малышев В.В. .....47, 49, 59
Малютин М.С..... 302
Мамиев В.С. ..... 37
Мамонов А.М. ..... 354
Мамонов С.А.....255, 258
Мануйлова Н.Б. ..... 343
Манучаров Д.Р. ..... 111
Манушичев С.Ю. .....60, 63
Маркова А.С..... 64
Маркова Е.В. .....349, 362
Мартинов Г.М. ..... 215
Мартынюк А.В. ..... 211
Марчук О.А. ..... 275
Матасов И.И. ..... 399
Матвеев Ю.А. ..... 72
Махров В.П. ..... 213
Мацокин А.С. ..... 276
Мельник Д.Ю. ..... 132
Мельников А.А. ..... 306
Мельников И.С. ..... 305
Мельничук В.Н. ..... 17
Меньшуткин М.А. ..... 12
Мессинева Е.М. ....100, 103, 121, 126
Метечко Л.Б. .....78, 79, 93, 95, 107
Мешков Д.А ..... 279
Мешков Д.А. ..... 278
Мигушин Ю.А. ..... 133
Микрюков А.О. ..... 400
Минашкин А.Д..... 64
Миндлин В.Л..... 194
Мифтахова А.Р..... 401
Михалева А.Д..... 402
Михеев В.А. ..... 153
Мовчан А.А. ..... 418

Могдалев А.М. .....134
Мое Хеин Зин .....29
Моени Табатабаи Д.М. .....195
Моисеев В.С. .....268, 272, 342
Монастырских М.С. .....279
Моргунов Ю.А. .....184
Морозов В.А. .....280
Москвин Н.В. .....111
Московсков А.О. .....196
Мочалова С.М. .....96
Мубаракзянова Д.Д. .....307
Мунё С.И. .....197
Муратаев Ф.И. .....322, 338
Мусаева А.А. .....197, 198
Мухамадеев И.М. .....185, 325
Мухортов В.А. .....199
Мущак Н.Д. .....404
Наветкин М.А. .....200
Нагорная В.С. .....306
Надежкина Е.В. .....96, 124
Назаров И.С. .....241
Найченко М.В. .....77, 220
Науменков А.А. .....343
Наумова Ю.А. .....297
Невровский В.А. .....208
Нестеренко Е.С. .....254, 260, 265
Нечаев Л.М. .....352
Низамаев Т.М. .....404
Низамов Р.А. .....325
Никитин А.Д. 368, 378, 422, 427, 428
Никитин И.С. .....395, 423
Никитин П.В. .....43
Никитин Я.Ю. .....344
Никитина А.Е. .....98
Николаев И.А. .....345
Николаева М.В. .....346
Новиков Г.В. .....306
Новожилов В.В. .....99
Новосёлов С.А. .....13
Носов Г.А. .....31
Ночовная Н.А. .....344
Нурмухамедова А.Д. .....135
Ньян Мин Хтет .....20, 28, 40, 41
Оболенцев Д.С. .....136
Овечко В.М. .....60, 63
Овчарова П.А. .....281, 282
Овчинников А.В. .....265
Овчинников Е.И. .....406
Озерных В.С. .....407
Окатьев Р.С. .....408
Олешко В.С. .....358
Орлов А.А. .....332, 335, 347
Орлов В.П. .....50
Осаченко М.Д. .....201
Остапенко Ю.В. .....32
Островский А.Г. .....137
Павлов В.В. .....186
Павлов Е.А. .....32
Павлов П.В. .....111
Павлов Ю.С. .....282
Пагур Е.С. .....100
Падалко С.Н. .....133
Пак Сонги .....65, 74
Палешкин А.В. .....26, 122, 135, 145
Панфилов Г.В. .....409, 412
Панченков А.Г. .....136
Паруткина К.А. .....33
Патрушев А.Ю. .....348
Пашков И.Н. .....280, 288
Певтулиди Т.А. .....138
Перепонов А.М. .....363
Першуков М.М. .....349
Петров А.П. .....271
Петров И.А. .....260, 262, 287
Петров М.Е. .....45
Петров Ю.В. .....385
Петрунина Е.С. .....307
Петрухин Н.В. .....409
Петухов В.Г. .....10, 13, 14
Петухова О.С. .....350
Пинкус Д.Р. .....410
Пинкус Ю.В. .....410
Писарев А.В. .....351, 396
Пискунов М.А. .....139
Пичулин В.С. .....90, 91, 98
Платонов В.И. .....413, 417
Подольская Е.А. .....404
Подъяпольская Е.В. .....202
Поливников В.М. .....63
Полин А.В. .....34

Полищук С.Д. ..... 140
Поляков О.А. ..... 268
Полянская Л.В. ..... 351, 396
Попов А.Л. ..... 371
Попов И.А. ..... 398
Попов Ф.С. ..... 411
Поспелов А.А. ..... 141
Поспелов А.Р. ..... 203
Поцелуев К.О. ..... 412
Пронина П.Ф. ..... 96, 142
Просвирнин Д.В. ..... 339
Проскурина И.П. ..... 66
Прудников В.А. ..... 261
Прудников Ф.Е. ..... 43
Пугачев И.А. ..... 159
Пушной А.А. ..... 204
Радин Д.В. ..... 35
Рамазанова Д.Р. ..... 36
Ратников А.В. ..... 302
Ревенков А.В. .....18, 54, 57, 62, 64
Резниченко Г.М. ..... 310
Ремчуков С.С. ..... 206
Родченко В.В. ..... 80
Рожков В.Н. ..... 212
Романов П.В. ..... 413
Рубан В.Д. ..... 37
Русин И.С. ..... 352
Ручинский В.С. ..... 9
Рыбакова А.В. ..... 207
Рысаева Л.Х. ..... 414
Рэйляну М.Д. ..... 415
Рябышников А.С. ..... 208
Ряховский А.П. ..... 289, 290
Савельев С.В. ..... 209
Савин Д.В. ..... 308
Савушкин А.Н. ..... 344
Садковский Б.П. ..... 221, 284
Сазонов В.С. ..... 113
Сайганов Д.А. ..... 142
Салгин Р.Ю. ..... 13
Салиенко Н.В. ..... 294, 296
Салмин П.А. ..... 353
Салохиддин У.Г. ..... 250
Салтыков А.В. ..... 67
Сальников Н.А. ..... 242
Самойленко В.В. ..... 309
Самохвалов И.А. ..... 416
Самсонов Н.А. .....231, 417
Сафронов П.А. ..... 418
Сахбутдинова В.Р. ..... 304
Седова Ю.Е. ..... 243
Селиванова О.С. ..... 419
Сельцова С.А. ..... 143
Селявина М.П. ..... 23
Семавина Н.А. ..... 39
Семенов В.Н. ..... 40
Семенов Д.А. ..... 101
Семенов П.Е. ..... 421
Сёмкин В.В. ..... 299
Сергеев Д.В. ..... 68
Сергеев Н.М. ..... 82
Серов М.М. .....255, 291, 348
Сидоров Д.Н. ..... 283
Силуянова М.В. .....155, 166, 176, 177, 197, 214
Сильченко О.Б. .....216, 219, 283
Симонов А.М. ..... 37
Сирота А.А. ..... 68
Скачков И.А. ..... 310
Скворцова С.В. .....161, 331, 332, 335, 347
Скубов Д.Ю. ..... 398
Слабиков Б.А. ..... 284
Слезов С.С. .....341, 354
Слюсарев А.А. ..... 310
Смирнов А.М. ..... 392
Смирнов Н.Я. ..... 232
Смыков А.Ф. .....257, 286
Советников Я.Н. ..... 70
Сое Паинг Туу ..... 13
Соколов А.В. ..... 276
Соловьёв Н.Г. ..... 394
Соловьева И.В. ..... 334
Соловьянчик Л.В. ..... 306
Солодова Т.В. ..... 355
Соломонова М.К. ..... 144
Соляев Ю.О. .....372, 381
Сороколетов В.А. ..... 142
Сотникова Е.В. .....88, 106
Сотникова Ю.С. .....305, 312

Сперанский К.А. .....292, 354
Стариков С.В.....377
Старобинский Е.Б. .....435
Степанов Е.В. .....37
Степанов Л.И. .....422
Степушин А.С. .....332
Степынин С.С. .....245
Стеценко Н.С. .....423
Столяров И.В. .....437
Стратула Б.А. .....423
Строгонова Л.Б. .....92, 99
Строкова Е.Ю. .....38
Субботин Н.Ю. .....207
Суворова О.С. .....102
Судуков А.Э. .....126
Сумин С.А. .....356
Сурнова А.В. .....303
Сыздыков Ш.О.....145
Сыромятников Н.А. .....242
Сыромятников С.А. .....148
Сысуев Д.И.....146
Тарасов В.А. .....210
Тарасов В.И. .....284
Татарникова В.В. .....103
Тельканов М.А. .....424
Тептеева Е.С.....426
Терентьев М.Н. .....110, 113, 116, 130, 132
Терехов А.С.....147
Тесаков Д.М. .....426
Тиабашвили А.Т. .....357
Типалин С.А.....324
Титов Д.М. .....19
Титова Е.Д. .....211
Тишин Н.А. .....427
Ткаченко В.Г. .....428
Токарев А.С.....46, 52, 57, 58, 66, 71
Токарев В.А.....53
Токмакова Т.В.....193
Тормозов А.Е. .....212
Торпачев А.В. .....51, 105, 138, 139
Третьяков Н.К. .....39
Трифонов М.В.....60
Трубицына А.Н. .....286
Тузиков С.А. .....23, 27, 33
Тун Мин Лат .....20, 41
Тун Фон Мьинт.....40
Туркин И.К.....25, 32
Тюрин А.В.....429
Устинов А.А.....313
Устинов К.Б. .....370, 387
Уханова А.М. .....363
Фадеев Е.П. .....431
Фадеев М.А. .....148
Фатеев К.С. .....71
Федоренко Р.В. .....431
Федоров А.А. .....273
Фёдоров А.В. .....56, 358
Федорова А.Д.....380
Фёдорова Н.В.....71
Федорцов Р.С. .....262, 287
Федосеев Г.А. .....104
Феоктистов В.А. .....213
Феофанов А.С. .....72
Фертиков А.О. .....214
Филатов С.Е. .....215
Финогенова Ю.М.....260
Фирсюк С.О. .....74
Флотский А.А. .....314
Фокин А.С. .....216
Фомин Е.В.....433
Фомичева Н.Б. .....327
Фон Мьинт Тун.....29
Фоченков А.И. .....218
Фурсик М.Ю. .....246
Халикова А.А.....359
Хамзатханов С.С. .....219
Хамидуллин О.Л.....304
Харитонов А.К.....105
Хасанова А.Р.....315
Хван А.Г. .....220
Хейе Зин Мое.....40
Хилов П.А. .....320
Хлевина В.Г. .....247
Хопин П.Н.....164, 218, 246
Худяков А.А. .....360
Цыденов К.А. .....316
Цыкин А.Е.....221
Чалов А.Ю.....106
Чаплыгин К.К. .....361

Чверткин А.Г. ..... 89
Чвёрткин А.Г. ..... 94
Черданцева Е. ..... 129
Черевиченко А.В. ..... 154, 222
Черников Д.Г. ..... 357
Черноглазов П.А. ..... 317
Черноглазова А.В. ..... 317
Чернышова Ю.В. ..... 346
Черняев А.В. .....87, 426, 436
Четверикова А.В. ..... 223, 248
Чечуга А.О. ..... 362
Чжоу Жуи ..... 14
Чибисова Е.В. ..... 363
Чубуков А.И. ..... 322, 338
Чумадин А.С. ..... 179
Чумак В.Н. ..... 318
Шабайкин Р.Р. ..... 434
Шангин И.А. ..... 104
Шандрук В.С. ..... 224
Шаповалов Р.В. ..... 134
Шаргаев Е.О. ..... 288
Шаталова М.Ю. ..... 107
Шахлай Д.В. ..... 141
Шахривар С.М. ..... 195, 225
Шварёв Н.Г. ..... 435
Шелест Д.О. ..... 436
Шелихевич А.С. ..... 289
Шелутко В.А. ..... 82
Шеметова Е.В. ..... 149
Шемонаева Е.С. ..... 247
Шестернин Д.С. ..... 73
Шешенин М.А. ..... 437
Шикалов В.Н. ..... 226
Шипунов В.В. ..... 438
Шлёнский А.Г. ..... 356
Шляпцева А.Д. .....289, 290
Шмырова А.В. ..... 364
Шоль Д.Е. ..... 129
Шувалов Г.К. ..... 249
Шустров Т.Л. ..... 108
Щербина А.С. ..... 290
Юлдашбаев И.А. ..... 250
Юн Сон Ук .....65, 74
Юрин В.Н. .....190, 230, 236
Юрченко Д.А. ..... 319
Ягудин Т.Г. ..... 341
Якимова Е.И. ..... 439
Яковенко А.А. ..... 440
Яковлев С.С. ..... 441
Якурнова К.А. ..... 227
Ярилов П.А. ..... 150
Ярославцев Н.Л. ..... 206
Ярошенко А.С. ..... 291
Яруллин Д.Т. ..... 442
Яшин И.И. .....157, 320

**Гагаринские чтения – 2018**
**XLIV Международная научная молодёжная конференция**

Сборник тезисов докладов конференции

Том 3

gagarin.mai@gmail.com
www.gagarin.mai.ru

Учёный секретарь:
*М. Гордеева*

---

Оформление обложки:
*А. Вороненко*

Вёрстка:
*Р. Некрасова*

Подписано в печать 27.03.2018
Формат 60x90 1/16
Гарнитура Times New Roman
Печать цифровая. Усл. печ. л. 14,12
Тираж 200 экз.
Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии «Luxor-print»