

*На правах рукописи*

Ляховецкий Максим Александрович

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСО- И ФРЕТТИНГСТОЙКОСТИ ОКСИДОВ  
АЛЮМИНИЯ И ЦИРКОНИЯ, СФОРМИРОВАННЫХ МЕТОДОМ  
МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЭЛЕМЕНТОВ  
ДВИГАТЕЛЕЙ И ЭНЕРГОУСТАНОВОК

Специальность: 05.07.05 «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки  
летательных аппаратов»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Москва - 2014

Работа выполнена в Московском авиационном институте  
(национальном исследовательском университете) МАИ

- Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Лесневский Леонид Николаевич
- Официальные оппоненты: Куксенова Лидия Ивановна,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБУН «Институт машиноведения  
им. А.А. Благоднарова» РАН,  
заведующая лабораторией  
«Методы и технологии упрочнения»
- Эпельфельд Андрей Валерьевич,  
доктор технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВПО «МАТИ – Российский  
государственный технологический университет  
им. К.Э. Циолковского»,  
доцент кафедры «Технология производства приборов  
и систем управления летательных аппаратов»
- Ведущая организация: ГНЦ ФГУП «Центральный институт авиационного  
моторостроения имени П.И. Баранова»  
(«ЦИАМ им. П.И. Баранова»)

Защита состоится «15» декабря 2014 года в 13 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета Д212.125.08, созданного на базе Московского авиационного института (национального исследовательского университета) МАИ, по адресу: 125993, Россия, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МАИ и на сайте: <http://www.mai.ru/events/defence>

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2014 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д212.125.08,  
д.т.н., профессор

Зуев Юрий Владимирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность

Повышение ресурса и надежности элементов двигателей летательных аппаратов (ДЛА) и энергоустановок (ЭУ), а также систем, обеспечивающих их эффективное функционирование в составе летательных аппаратов и технологичность при изготовлении, характеризуются непрерывным ужесточением условий их эксплуатации и производства. Это приводит к возникновению целого ряда конструкторско-технологических проблем, связанных с использованием, прежде всего, металлов с низким удельным весом и высокой удельной прочностью, таких как Al, Ti, Mg, Zr и их сплавов, относящихся, как известно, к группе «вентильных».

Важнейшей характеристикой эффективного функционирования элементов двигателей летательных аппаратов (ДЛА) и энергетических установок (ЭУ), входящих в состав атмосферных летательных аппаратов (ЛА) и космических летательных аппаратов (КЛА) и систем их обеспечения является сопротивление различным видам механического износа.

Известно, что для авиационно - космического производства характерно широкое использование алюминиевых сплавов, традиционно защищаемых от износа методами анодирования. Но, как показывает сравнительный анализ, покрытия, получаемые методом микродугового оксидирования, обладают лучшими физико-механическими и эксплуатационными характеристиками.

Несмотря на относительную простоту и перспективность, метод МДО пока не нашёл широкого применения в трибосопряжениях, используемых в ДЛА и ЭУ. Это объясняется тем, что не разработаны опытные технологии и не определены оптимальные режимы формирования оксидных износостойких покрытий, соответствующих экстремальным условиям их эксплуатации в составе ДЛА и ЭУ, недостаточно изучены процессы, особенности и условия разрушения МДО покрытий при изнашивании.

В связи с этим актуальность темы настоящей работы определяется: в научном плане — разработкой и исследованием способов МДО и оптимизацией их режимов для получения композиционных керамических оксидов алюминия и циркония триботехнического назначения, стойких к различным видам износа; в практическом отношении — созданием технологий, позволяющих значительно повысить износ- и фреттингостойкость элементов, изготовленных из сплавов алюминия и циркония, обеспечить их заданный ресурс и надежность, а также решить ряд технологических и экологических проблем при разработке технологического оборудования.

### Цель работы

**Цель работы** — разработка научно-обоснованных методов повышения износ- и фреттингостойкости композиционных керамических покрытий на основе оксидов алюминия и циркония, получаемых методом микродугового оксидирования для элементов ДЛА и ЭУ.

## **Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:**

1. Разработка математических моделей формирования покрытий на алюминиевых и циркониевых сплавах, устанавливающих взаимосвязь режимных параметров и составов электролитов процесса МДО с оптимальными характеристиками и свойствами получаемых покрытий для заданных условий эксплуатации.
2. Проведение анализа современного состояния вопроса о механизмах и физических моделях процессов механического изнашивания и фреттинг-изнашивания.
3. Создание оборудования и методик определения износа и фреттинг-износа МДО покрытий, коэффициентов трения и амплитуд взаимного перемещения для различных режимов механического изнашивания от частичного проскальзывания до возвратно-поступательного движения в заданных условиях работы контактов трения.
4. Разработка методик и построение карт износа и фреттинг-износа МДО покрытий с определением типов исследуемых контактных взаимодействий.
5. Разработка опытных технологических процессов и рекомендаций по их применению для повышения надёжности и ресурса элементов ДЛА и ЭУ.

## **Научная новизна**

1. С использованием математических методов планирования эксперимента определены режимы процесса МДО, оптимальные составы электролитов и получены регрессионные зависимости выходных характеристик покрытий от режимных параметров технологического процесса.
2. Проведены анализ и физическое моделирование процессов изнашивания и фреттинг-изнашивания металлов и керамических МДО покрытий.
3. Разработаны методики и получены карты износа и фреттинг-износа для алюминиевых сплавов с МДО покрытиями для требуемых условий эксплуатации.
4. Для МДО покрытий, работающих в условиях фреттинг-износа, определены критерии перехода между режимами частичного проскальзывания и полного скольжения.
5. Установлена взаимосвязь между разрушением композиционных МДО покрытий, сформированных на алюминиевых сплавах, и условиями нагружения.
6. Подтверждена возможность формирования на циркониевом сплаве МДО покрытий, позволяющих повышать коррозионную и износостойкость рабочих поверхностей элементов ДЛА и ЭУ.

## **Практическая ценность**

1. Создан комплекс установок и разработаны методики для исследования основных видов механического изнашивания материалов и покрытий.
2. Разработана и опробована методика построения карт износа и фреттинг-износа, позволяющих получать научно полезную сравнительную информацию о механизмах и параметрах изнашивания и фреттинг-изнашивания конкретных контактных пар трения в заданных условиях эксплуатации.
3. Получены и внедрены в опытно-конструкторские работы предприятий, занимающихся проектированием и изготовлением ДЛА и ЭУ, следующие результаты:

- опытный технологический процесс и оптимальные режимы формирования керамического покрытия, полученного методом МДО для защиты от износа и фреттинг-износа детали (стакан подшипника), выполненной из алюминиевого сплава АК4-1, блока насосов двигателя РД-33 серии 4 (ОАО ММП им. В.В. Чернышева);

- результаты сравнительных испытаний износостойкости материалов пары трения: сталь ШХ15 и алюминиевый сплав АК4-1 с МДО покрытием и без в условиях возвратно-поступательного движения в среде различных масел, используемых в агрегатах масляной системы двигателей АЛ 31Ф и АЛ41Ф (НТЦ «ОКБ им. А.Люлька»);

- опытные технологические процессы формирования МДО покрытий, результаты анализа и методики построения карт износа и фреттинг-износа алюминиевых сплавов Д16 и АК4 для использования в опытно-конструкторских разработках по созданию свободно-поршневых двигателей для комбинированных энергоустановок и энергоустановок на основе поршневых двигателей Стирлинга (НТЦ «Силловые агрегаты» МГМУ МАМИ);

- опытный технологический процесс и рекомендации по формированию оксидных покрытий методом МДО, на образцах из циркониевого сплава для целенаправленного формирования диоксида циркония заданного фазового состава с преобладанием тетрагональной фазы (НПЦ «Трибоника»);

- опытные технологические процессы формирования комбинированных МДО покрытий на циркониевом сплаве и их характеристики для защиты от износа рабочих поверхностей подшипников скольжения узлов трения космической энергетической установки (ОАО «Красная Звезда»);

- обоснование выбора метода МДО для защиты от коррозии и фреттинг-износа элементов ядерных энергоустановок, изготавливаемых из циркониевых сплавов, состав многокомпонентного электролита и режимы, позволяющие получать диоксиды циркония заданного фазового состава (Институт прикладных ядерных технологий НИЯУ МИФИ);

- разработка в соавторстве новой рабочей программы дисциплины «Технология производства энергетических установок летательных аппаратов», подготовка лекций и лабораторной работы, посвящённых методам формирования трибологических поверхностей, используемому оборудованию и процессу МДО (НИУ МАИ).

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Закономерности, устанавливающие связь оптимальных значений служебных характеристик покрытий, полученных методом МДО на алюминиевых и циркониевых сплавах, и регрессионные модели связи этих характеристик с режимными параметрами и составами электролитов.

2. Физические модели процессов механического изнашивания и фреттинг-изнашивания контактных пар с покрытиями.

3. Методики построения и карты износа МДО покрытий, полученных на алюминиевых сплавах, и результаты определения характеристик изнашивания на алюминиевых и циркониевых сплавах с покрытиями.
4. Методики построения и карты фреттинг-износа МДО покрытий, полученных на алюминиевых сплавах, и результаты определения характеристик фреттинг-изнашивания.
5. Опытные технологические процессы и рекомендации по использованию метода МДО для защиты от изнашивания и фреттинг-изнашивания элементов ДЛА и ЭУ.

### **Апробация работы**

Основные положения и результаты диссертационной работы доложены на следующих международных и всероссийских научно-технических конференциях: 12-ой, 13-й и 14-й Международных научно-практических конференциях "Ресурсосберегающие технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня" (Санкт-Петербург, 2010г., 2011г., 2012г.); 9-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика - 2010». Москва, 2010г.; XVII Международном симпозиуме "Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред" им. А.Г. Горшкова, Москва, 2011; 10-ой Международной конференции «Плёнки и покрытия – 2011», Санкт-Петербург, 2011; Седьмой Международной конференции «Материалы и покрытия в экстремальных условиях: исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий» МЕЕ-2012", Украина, Ялта, 2012; Международной междисциплинарной научной конференции: Седьмых Курдюмовских чтений «Синергетика в естественных науках», Тверь, 2011; XLI международной конференции «Физика взаимодействия заряженных частиц с кристаллами», Москва, 2011; Третьей международной научно-технической конференции «Нанотехнологии и наноматериалы», Москва, 2011; Восьмой Международной школе молодых учёных и специалистов «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами (IHISM-12 JUNIOR)», Нижний Новгород, 2012; XXII Международной Инновационно-ориентированной Конференции Молодых Ученых и Студентов «Актуальные проблемы машиноведения» МИКМУС-2012, Москва, 2012г; Московской молодёжной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике – 2013», Москва, 2013; Четвёртой международной конференции «High-Math-Tech», Украина, Киев, 2013; Международной конференции «Машины, технологии и материалы для современного машиностроения», ИМАШ РАН, Москва, 2013; XX Международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью (ВИП-2013)». Ярославль, 2013. В сборниках трудов этих конференций опубликовано 18 работ.

### **Публикации**

По результатам работы опубликовано 8 статей в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК.

## Структура и объём диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объём составляет 179 страниц, 118 рисунков. Список литературы составляет 192 наименования.

### Личный вклад соискателя

Заключается в том, что он лично провёл проектирование и оснащение экспериментальной установки по исследованию процессов изнашивания и фреттинг-изнашивания, лично выполнял подготовку и проведение экспериментов по формированию и исследованию изнашивания покрытий, проводил обработку и анализ полученных данных, и построение физических и численных моделей.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность исследования, связанная с повышением износо- и фреттингостойкости деталей узлов трения двигателей летательных аппаратов (ДЛА) и энергоустановок (ЭУ), выполняемых из алюминиевых и циркониевых сплавов, путём формирования на них композитных защитных покрытий методом микродугового оксидирования (МДО). В рамках этой проблемы сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

**В первой главе** рассмотрены технологические возможности методов повышения износо- и фреттингостойкости элементов ДЛА и ЭУ из алюминиевых и циркониевых сплавов, проведены анализ и оценка их применения.

*В производстве элементов газотурбинных двигателей (ГТД)* эти сплавы в основном используются в гидроагрегатах двигателя: топливных, масляных и гидравлических, и выбор конкретного материала в них определяется температурой эксплуатации и силовым воздействием.

Детали гидроагрегатов подвергаются различным видам изнашивания, таким как износ по механизму адгезионного взаимодействия (схватывания и фреттинг-износа), гидромеханические виды изнашивания (гидроабразивный и абразивный износ, кавитационные разрушения), контактная усталость и т.д. Наиболее характерными для авиационных гидроагрегатов являются контактно-вибрационные условия нагружения, возникающий при этом износ определяется, как фреттинг-износ, а при наличии сильного химического воздействия окружающей среды, как фреттинг-коррозия.

*В производстве двигательных установок (ДУ) с жидкостными ракетными двигателями (ЖРД)* алюминиевые сплавы в основном используются в ДУ малой тяги. Среди сборочных единиц и отдельных элементов таких ДУ, изготавливаемых из алюминиевых сплавов, преобладают детали турбонасосных агрегатов (ТНА), подвергающиеся высоким механическим нагрузкам и вибрации.

Характер нагрузок, действующих на элементы ТНА, и их величины позволяют считать, что основным видом их износа является фреттинг-износ. Хотя ДУ с ЖРД работает в полёте относительно короткое время, но с учетом времени стендовой отработки двигателя действующие экстремальные нагрузки в узлах

двигателя могут приводить к значительным разрушениям деталей в области контактов.

*В поршневых ДЛА и ЭУ* основными деталями, подверженными износу и выполняемые из алюминиевых сплавов, являются: поршневые кольца/гильза цилиндра, юбка поршня/гильза поршня, кроме того, трение в этих парах является основной составляющей механических потерь в двигателе. В зависимости от режима работы и конструкции двигателя эти потери составляют 40-75% от всех потерь трения в ДВС. Определенное место среди составляющих износа в ДВС занимает и фреттинг-износ, при этом основные места поражения фреттингом - поверхности стыка сборочных единиц двигателя и болтовые соединения.

*В производстве технологической оснастки* алюминиевые сплавы используются в изготовлении модельной оснастки, литьевых пресс-форм, в изготовлении различных элементов технологических операционных приспособлений, сборочных приспособлений, отдельных элементов кондукторов и копиров, контрольных приспособлений, в разной степени подверженных износу.

*В производстве изделий космической техники* широко используются алюминиевые сплавы: в отдельных деталях корпусов, в механизмах стыковки и механизмах развертывания, таких подсистем, как тарелки антенн, солнечные панели, холодильники-излучатели (ХИ) и др. с защитными покрытиями и вопросы их изнашивания и коррозионной стойкости также важны.

*В составе ДЛА и ЭУ цирконий и его сплавы* используются, в основном, в виде оксидов. В авиационно-космических приложениях эти оксиды применяются: для облицовок цилиндров поршневых двигателей, как материал с ионной проводимостью в датчиках кислорода, в пьезоэлектрических элементах различных приборов, в компонентах композиционных материалов, используемых при изготовлении катализаторов и твердых топливных элементов, в качестве материалов теплозащиты и теплозащитных покрытий, в составе износостойких пар трения, работающих при повышенных температурах. Среди других приложений циркония и его сплавов следует назвать его использование в качестве основного материала таких элементов ядерного реактора типа ВВЭР, как оболочки твэлов, дистанционирующие решетки (ДР), направляющие каналы (НК) и тепловыделяющие сборки (ТВС).

Использование оксидов алюминия и циркония в производстве ДЛА и ЭУ активно расширяется, а разработка новых технологий формирования износостойких и фреттингостойких покрытий на деталях из алюминиевых и циркониевых сплавов представляется важной. Не менее важной можно считать и появляющуюся возможность замены некоторых деталей, выполняемых по технологии прессования из порошков оксидов  $Al_2O_3$  и  $ZrO_2$ , на детали, изготавливаемые механической обработкой из алюминиевых и циркониевых сплавов с последующим формированием композиционных керамических покрытий.

Для защиты алюминиевых сплавов, применяемых в производстве ДЛА и ЭУ, а также ЛА и КЛА, используются в основном гальванические покрытия и анодирование. Однако в последние годы, как в России, так и за рубежом предпочтение всё больше отдаётся процессу МДО, который является естественным

развитием процесса анодирования, но превосходит его практически по всем характеристикам.

Импульс к широкому практическому применению процесса МДО дали исследования Г.А. Маркова с сотрудниками из Института неорганической химии СО РАН. В настоящее время технология МДО хорошо изучена в применении к алюминиевым сплавам, в меньшей степени это касается циркониевых сплавов. На данный момент количество публикаций по МДО циркониевых сплавов не превышает 5-7% от всех публикаций, связанных с процессом МДО.

Состав оборудования для реализации процесса МДО близок по своему содержанию к обычному анодированию, но содержит более сложные источники питания (ИП). Принципиальная схема установки МДО с конденсаторным ИП представлена на рисунке 1.

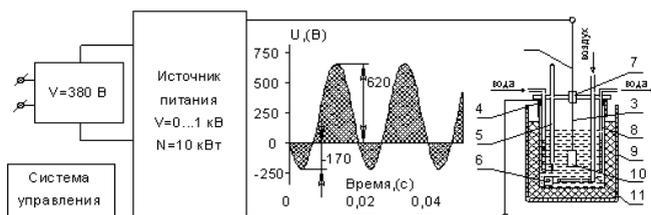


Рисунок 1 – Схема конденсаторной установки МДО

Проведённый анализ МДО обрабатываемости деформируемых сплавов (Д16 и АК4) позволил определить технологических режимы МДО этих сплавов и составы электролитов для проведения последующей оптимизации для достижения цели настоящего исследования. Но при использовании этих электролитов для МДО циркониевых сплавов было установлено, что природа взаимодействия их пассивирующих и растворяющих компонентов иная, поэтому получение МДО покрытий на циркониевых сплавах необходимо связывать с поиском новых композиций электролитов и возможностью более эффективного регулирования параметрами процесса с помощью импульсных ИП.

В этой главе рассмотрены существующие представления об изнашивании керамик, поскольку покрытия, формируемые методом МДО, по своим характеристикам относятся к разряду композиционных керамических материалов. Механизм износа керамик значительно отличается от износа металлов, и в основе этого отличия лежит природа межатомных связей, которая характеризуется ограниченной возможностью пластического деформирования керамик. В связи с этим большие тангенциальные усилия, например, при сухом трении могут вызывать появление трещин в керамическом материале и его излом при ограниченном пластическом деформировании.

В зависимости от скорости перемещения тел в контакте, значения нормальной нагрузки и условий среды различают три вида износа керамик: умеренный, интенсивный и экстремальный износ. При умеренном износе создаваемое напряжение в контакте не превышает прочности керамики при растяжении, но в локальных местах, обусловленных наличием шероховатости поверхности,

поверхность может разрушаться, что происходит, в основном, по границам зерен с образованием гладкой поверхности. В случае интенсивного износа значения растягивающих напряжений в контакте значительно увеличиваются, что приводит к образованию шероховатой поверхности в пятне контакта, неустойчивому режиму трения при доминирующем механизме хрупкого межзеренного растрескивания и образованию частиц износа (дебризов) заостренной формы. Экстремальный износ керамики характеризуется резким повышением температуры в контакте, что вызывает транскристаллитное растрескивание и отделение кластеров материала.

Если вопросы износа технической оксидной керамики ещё обсуждаются в отечественной и зарубежной литературе, то вопросам фреттинг-износа оксидной технической керамики и оксидных керамических покрытий, особенно получаемых методом МДО, уделено совершенно недостаточно внимания. Поэтому цель настоящего исследования - восполнить отчасти пробел в этой области. В конце главы сформулированы задачи настоящей диссертационной работы, решение которых необходимо для достижения поставленной цели исследования.

**Вторая глава** посвящена анализу и моделированию процессов изнашивания при различных видах трения. Для деталей элементов ДЛА и ЭУ, работающих в условиях трения и вибрации, характерны различные виды сопряжений: вал/ступица, втулка/корпус, соединение плоских деталей заклепками, штифтами, болтами с натягом, шпоночные и шлицевые соединения и др. Все эти виды сопряжений можно соотнести с типовыми контактами, реализуемыми в лабораторных машинах трения: плоскость/плоскость, сфера/плоскость, цилиндр/цилиндр с различными углами между образующими, цилиндр/внутренний цилиндр и др., расчет контактного взаимодействия которых производится по теории Герца.

Одной из задач данной работы являлось определение границ переходов между режимами изнашивания исследуемой пары трения и установление областей типов изнашивания в каждом режиме. В связи с этим было принято, что изнашивание тел при возвратно-поступательном движении претерпевает несколько

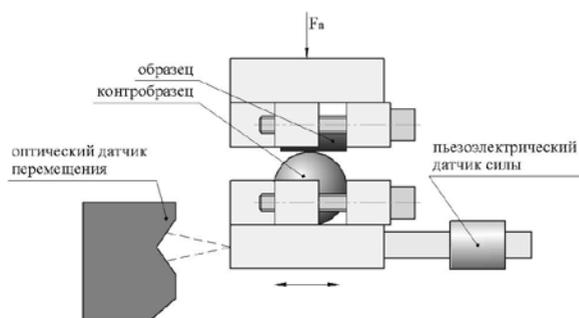


Рисунок 2 – Схема узла трибоконтакта, реализованная в машине трения

переходов от фреттинг-износа (схватывание, смешанный режим, частичное проскальзывание, полное скольжение) к изнашиванию при возвратно-поступательном движении. Схема, применяемая для исследования узла трибоконтакта, показана на рисунке 2.

Принимая, что при небольших значениях нормальной силы  $F_n$  относительное перемещение тел возможно только за счет сил упругости, возникающих в материале,

получим, что в этом случае графическая зависимость силы трения от перемещения за один цикл равный  $l/f$  будет выглядеть как прямая линия, где угол наклона является коэффициентом ( $k_e$ ), отражающим упруго-механические свойства пары трения (рисунок 3а). Такой тип взаимодействия при фреттинге получил название упругого схватывания или ложного фреттинга.

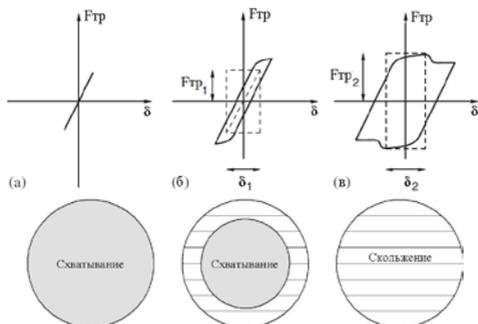


Рисунок 3 – Графическое изображение режимов фреттинга (петель износа):  
 а) упругое схватывание, б) частичное проскальзывание,  
 в) полное скольжение.

Дальнейшее увеличение тангенциальной силы будет вызывать относительное проскальзывание тел в кольцевой зоне (рисунок 3б) на периферии контакта вследствие превышения силы трения ( $\mu F_n$ ) в этой зоне внешней тангенциальной силой ( $F_t$ ), по закону Амонтона-Кулона:  $F_t \geq \mu F_n$ . Остальная же часть контакта будет по-прежнему находиться в зоне упругого взаимодействия. Графическая зависимость силы трения от перемещения при этом будет изменяться в сторону уширения петли в начале координат и появления гистерезиса. Гистерезис в петле определяет потерю энергии за один цикл трения в контакте и является основой для анализа трения с использованием *энергетического подхода*. С дальнейшим увеличением тангенциальной силы кольцевая зона проскальзывания будет увеличиваться, а упругая – уменьшаться. После того как зона упругого взаимодействия полностью исчезнет, т.е. тангенциальная сила превысит значения максимального давления в центре контакта, фреттинг перейдет в стадию так называемого полного скольжения (рисунок 3в).

Граница между стадиями полного скольжения при фреттинге и классическим возвратно-поступательным изнашиванием определяется по условию превышения амплитуды перемещения тела ( $\delta_x$ ) значения величины радиуса пятна контакта ( $a$ ), т.е. при выполнении условия  $\delta_x \geq a$ .

Для изучения процесса фреттинг-износа важным является определение границ перехода между режимами фреттинга и построение их графических зависимостей от нормальной силы и перемещения, называемыми картами фреттинга. При их построении применяется два подхода: первый подход, основан на металлографическом исследовании трущихся материалов и изучении повреждений в пятне контакта; второй подход, основан на непрерывной регистрации зависимости

силы трения от перемещения в течение всего эксперимента и определении режимов по виду петель и изменении их формы и энергетических параметров в динамике.

Большим достоинством второго подхода является возможность определения режимов работы контакта трения непосредственно во время эксперимента, поэтому для выявления перехода между режимами фреттинга используются следующие критерии (рисунок 4): энергетическое соотношение  $A = E_d/E_t$ ,  $A_t = 0,2$ ; соотношение апертур  $B = \delta_o/\delta_s$ ,  $B_t = 0,26$ ; коэффициент без учета упругости системы  $C = E_d/E_o$ ,  $C_t = 0,77$ , где  $A_t$ ,  $B_t$ ,  $C_t$  – переходные значения параметров из частичного проскальзывания в полное скольжение.

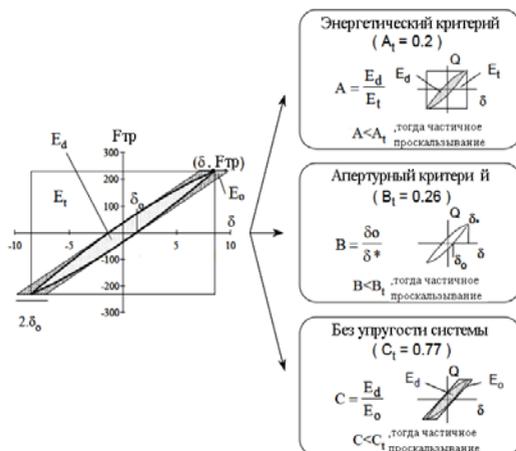


Рисунок 4 – Критерии для определения перехода из режима частичного проскальзывания в режим полного скольжения

Использование *энергетического подхода* к анализу и определению режимов фреттинг-изнашивания, позволяет не только строить карты фреттинга, но и прогнозировать объемный износ материала в зависимости от суммарной энергии, затрачиваемой за весь эксперимент. Отношение объемного износа материала ( $W_v$ ) к полной энергии ( $\Sigma E_d$ ), затрачиваемой на трение, при неизменном механизме разрушения является постоянной величиной и обозначается как энергетический коэффициент объемного износа ( $\alpha$ ):  $\alpha = W_v/\Sigma E_d$ .

**В третьей главе** рассмотрены методические вопросы формирования покрытий и исследования их физико-химических и эксплуатационных свойств.

*Толщина покрытий*, определялась методами неразрушающего (прибор ВТ10НЦ) и разрушающего контроля на металлографическом шлифе поперечного сечения образца с покрытием (прямой и косой срез), *металлографическая подготовка* которого проводилась на оборудовании фирм Struers и Buhler.

*Измерение объема изношенного образца* осуществлялось с использованием специально разработанной методики с помощью профилометра SJ210 путем измерения размеров пятна износа в нескольких плоскостях и численной обработке полученных результатов.

*Напряжение электрического пробоя* композиционных керамических покрытий определялось на приборе УПУ-10 с постоянным и переменным напряжением от 0 до 10 кВ.

*Твердость* образцов с покрытием определялась по методу Супер-Роквелла с помощью прибора 2143 TRC и фиксировалась по шкале Т при внедрении в металл стального шарика диаметром 1,588 мм под нагрузкой 15 кг при времени выдержки под общей нагрузкой 10 с.

*Микротвердость* покрытия измерялась с помощью микротвердомера модели ПМТ-3 на прямом поперечном ( $90^\circ$ ) и косом (угол от  $3^\circ$ - $6^\circ$ ) шлифах при нагрузке 0,981Н с алмазной пирамидой Виккерса и со временем выдержки под нагрузкой - 15с.

*Коррозионная стойкость* МДО на алюминиевых сплавах определялась по стандартной методике, используемой как экспресс-метод, по визуальному наблюдению за изменением цвета капли при воздействии на покрытие раствора, состоящего из кислоты HCl и соли  $K_2CrO_4$ . Продолжительность времени, при котором наступало изменение цвета капли с оранжевого (исходного) на зеленый цвет, принималось за относительную характеристику стойкости покрытия. Коррозионная стойкость МДО на циркониевом сплаве определялась по методике автоклавных испытаний в ИПЯТ НИЯУ МИФИ.

*Структура и химический состав* образцов с покрытиями проводился с помощью оптической и растровой электронной микроскопии (РЭМ). Исследование морфологии поверхности покрытий, их сечений, а также пятен износа проводилось на оптических микроскопах ВХ-51 фирмы Olympus (Япония), металлографическом микроскопе МЕТАМ РВ-23 фирмы ЛОМО (Россия), стереомикроскопе МБС-9 фирмы ЛЗОС (Россия), а также на РЭМ JSM-7600F с приставкой для ЭДС и ВДС от Oxford instruments (ЦКП ТИСУМ), FEI Quanta 600 FEG с системой микроанализа EDAX Trident XM 4 (ЦКП «Центр Келдыша») и Karl Zeiss EVO-40 с приставкой для ЭДС от Oxford instruments. Исследование химического состава образцов производилось микроанализом на РЭМ методами энерго-дисперсионного (ЭДС) и волно-дисперсионного анализа (ВДС).

*Фазовый состав* покрытий определялся методами рентгенофазового анализа на дифрактометрах D8 ADVANCE фирмы Bruker (Германия) и EMPYREAN фирмы PANalytical (Нидерланды) (ЦКП ТИСУМ) в  $CuK\alpha_{1+2}$  излучении в непрерывном режиме в диапазоне углов  $2\theta$  от  $15^\circ$  до  $90^\circ$ , шаг сканирования  $0.0131303^\circ$  ( $\Delta 2\theta$ ). Для качественного фазового анализа использовали базу данных ICDD PDF-2. Анализ проводился в ручном режиме. Количественный фазовый анализ проводился нестандартным методом (методом Ритвельда) с использованием программного комплекса MAUD.

*Неразрушающие методы одновременного измерения толщины и элементного состава* МДО покрытий до и после коррозионных испытаний проводилось с использованием методов спектрометрии резерфордского обратного рассеяния (РОР) и ядерного обратного рассеяния (ЯОР) на спектрометрических комплексах

НИИЯФ МГУ с использованием пучков заряженных частиц циклотрона и электростатического генератора.

*Износостойкость и фреттингостойкость* образцов определялась, на специально разработанной машине трения (рисунок 5).

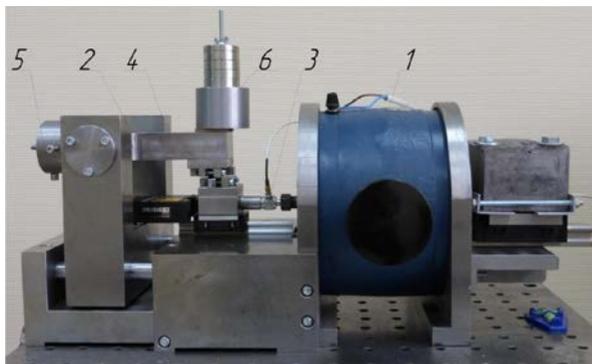


Рисунок 5 - Машина трения

Машина состоит из электромагнитного вибратора 1, который обеспечивает возвратно-поступательные перемещения одного из образцов, системы нагружения в виде уравниваемого балансом 5 рычага 2, передающего в место контакта нормальную нагрузку 6, которая

регулируется грузами различной массы, а также *системы управления* параметрами эксперимента, которая включает: генератор сигналов низкочастотный (ГЗ-112), усилитель синусоидального сигнала (ММФ VEB МЕТРА) с помощью которого происходит управление задаваемыми в эксперименте амплитудой и частотой, *систему контроля*: пьезоэлектрический датчик силы 3 типа PCB Piezotronic 208В ( $F_{\max} = \pm 200\text{Н}$ ) и контроллер сигнала PCB Piezotronic 482A22, лазерный датчик перемещения 4 Keyence LC2420 ( $D_{\max} = \pm 250\text{мкм}$ ,  $\Delta = 0,01\text{мкм}$ ) с контроллером Keyence LC2400А, и *систему регистрации и записи сигналов* на основе 4-х канального осциллографа приставки к персональному компьютеру АКТАКОМ АСК-3117 с программным обеспечением АКТАКОМ Oscilloscope PRO Multichannel.

Для исследования изнашивания образца с МДО покрытием использовались схемы сфера/плоскость и цилиндр/цилиндр. Контртелом (сферой) служил алмаз технический марки ОИ-12-2 с  $\text{Ø}3,7\text{мм}$ , а образцом – МДО покрытие, сформированное на плоском диске из алюминиевого сплава. Контакт цилиндр/цилиндр использовался при исследовании изнашивания циркониевого сплава с покрытиями, контртелом служил образец без покрытия. Во всех экспериментах возвратно - поступательное движение совершало контртело.

*Экспериментальная установка МДО* представляет собой традиционный комплекс с конденсаторным источником питания. С помощью персонального компьютера (PC) осуществлялось регулирование одним из режимных параметров ( $I_a$ ,  $I_c$ ,  $I$ ,  $U_a$ ,  $U_c$ ,  $C$ ) процесса с одновременным ограничением (верхним или нижним) остальных и регулирование температуры электролита.

Система управления установки МДО от ПК обеспечивала её работу в трёх режимах: ручной, диалоговый и автоматический. Для обеспечения равномерности покрытия на экспериментальном образце использовался дополнительный электрод,

конфигурация которого была ранее определена моделированием с привлечением конечно-элементного анализа.

Методы математического планирования эксперимента использовались для нахождения оптимальных значений требуемых параметров с применением методик полного и дробного факторного эксперимента и планирования на симплексе. Для формирования матриц планирования эксперимента и статистической обработки результатов эксперимента использовался блок «Планирование экспериментов» программного обеспечения «Statistica».

**В четвёртой главе** приведены результаты оптимизации МДО сплава Д16. В качестве выходных параметров процесса рассматривались: общая толщина покрытия ( $h_{\Sigma}$ , мкм), толщина износостойкого слоя ( $h_{осч}$ , мкм), микротвердость ( $H_{\mu}$ , МПа), твердость (HRC) и электрическая прочность ( $U_{пр}$ , В), наиболее важными из которых, для целей исследования, были приняты  $H_{\mu}$  и  $h_{осч}$  (скорость роста).

Результаты предварительных исследований при однофакторном эксперименте и варьировании следующих параметров режима:  $j = 5-10 \text{ А/дм}^2$ ,  $t = 150-240$  мин,  $T = 25^{\circ}\text{C}$ , в электролите состоящем из  $C_{\text{KOH}} = 0,5-3 \text{ г/л}$ ,  $C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3} = 1-11 \text{ г/л}$ ,  $C_{\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7} = 1-11 \text{ г/л}$ , которые показали, что влияние таких режимных параметров, как время и плотность тока подчиняется линейному закону, а влияние концентрации веществ электролита носит нелинейный характер, поэтому для определения оптимальных составов электролитов была использована матрица планирования симплекс-центроидного плана Шеффе со следующими варьируемыми факторами: KOH ( $x_1$ ),  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ( $x_2$ ) и  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  ( $x_3$ ). Для всех трех компонентов интервал варьирования был принят от 1 г/л до 8 г/л,  $j = 10 \text{ А/дм}^2$ ,  $T = 25^{\circ}\text{C}$ , а время оксидирования ограничивалось по условию равенства количества электричества, затраченного за весь эксперимент, значению  $100800 \text{ Кл/дм}^2$ . Матрица планирования и результаты экспериментов, которые повторялись дважды, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Часть матрицы планирования эксперимента для сплава Д16

№	KOH	$\text{Na}_2\text{SiO}_3$	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$	$h_{\text{сумм}}$	$h_{\text{осч}}$	$q_{\text{осч}}$	$V_{\text{осч}}$	HV	$U_{\text{бр}}$	HRT	$t_{\text{сог}}$
	г/л	г/л	г/л	мкм	мкм	Кл/мм <sup>3</sup>	мкм/мин	МПа	В	мин	мин
1	1	4,5	4,5	55	37,9	266	0,226	1357	780	85,1	-
2	1	1	8	43,7	18,9	533,3	0,113	1257	650	84,7	-
3	8	1	1	50,9	32,4	311,1	0,193	1386	1080	86	-
4	1	8	1	57,6	32,4	311,1	0,193	1225	640	87,1	-
<b>5</b>	<b>4,5</b>	<b>4,5</b>	<b>1</b>	<b>49,6</b>	<b>32,9</b>	<b>306,4</b>	<b>0,196</b>	<b>1478</b>	<b>870</b>	<b>87,4</b>	-
6	4,5	1	4,5	50,2	26,2	384,7	0,156	1201	600	84,5	-
7	3,3	3,3	3,33	51,9	25,9	389,2	0,154	1184	610	85,7	-

Расчеты основных характеристик покрытий, выполненные в соответствии с результатами экспериментов (таблица 4.1), позволили получить, наряду с другими, регрессионные зависимости для  $V_{\text{base}}$  и  $H_{\mu}$ :

$$V_{\text{base}} = 0,165x_1 + 0,163x_2 + 0,11x_3 + 0,016x_1x_2 + 0,022x_1x_3 + 0,238x_2x_3 - 0,895x_1x_2x_3 \text{ [мкм/мин]}$$

$$H_{\mu} = 1400,8x_1 + 1242,8x_2 + 1239,8x_3 + 594x_1x_2 - 478x_1x_3 + 362x_2x_3 -$$

- 2761,4x<sub>1</sub>x<sub>2</sub>x<sub>3</sub> [МПа]

где  $x_i$  - кодированное значение, соответствующее концентрации электролита.

Примеры диаграмм состав – толщина покрытия (рисунок 6а) и состав – микротвердость (рисунок 6б).

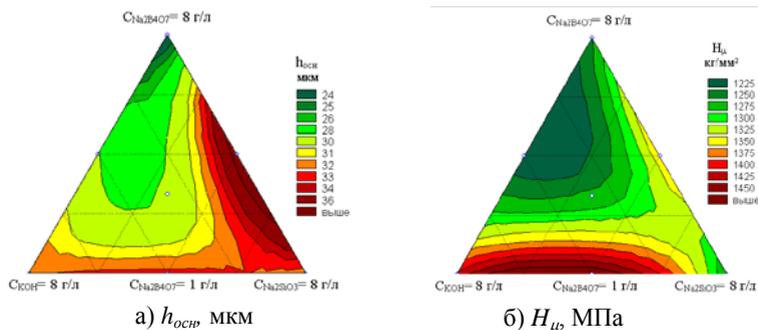


Рисунок 6 - Диаграмма влияния составляющих электролита на формирование МДО покрытия на сплаве Д16

Таким образом, удалось определить соотношения компонентов электролита для достижения наилучших характеристик покрытий ( $C_{KOH} : C_{Na_2SiO_3} : C_{Na_2B_4O_7}$  (г/л)): относительной толщины износостойкого слоя – 5,5 : 3,5 : 1, скорости роста покрытия и затрат электричества на него – 1 : 6 : 3, напряжения пробоя – 8 : 1 : 1, микротвердости – 5,5 : 3,5 : 1, коррозионной стойкости – 3 : 3 : 4.

Для исследования морфологии, элементного и фазового состава МДО покрытий, сформированных на сплаве Д16 был выбран образец №5 (таблица 1), как обладающий максимальной микротвердостью –  $H_{\mu 100} = 1478$  МПа и одной из максимальных толщин основного слоя –  $h_{осн} = 33$  мкм, при  $h_{сумм} = 50$  мкм, сформированный в электролите  $KOH - 4,5$  г/л,  $Na_2SiO_3 - 4,5$  г/л и  $Na_2B_4O_7 - 1$  г/л. Результаты исследования морфологии покрытия показали, что покрытие состоит из 3-х слоев: технологического – очень пористого толщиной 17 мкм, основного – толщиной ~ 33 мкм и барьерного ~ 1,5 мкм. По результатам элементного анализа было установлено, что покрытие в основном состоит из алюминия и кислорода и только в технологическом слое обнаруживается ~4% кремния. В результате рентгенофазового анализа было установлено, что покрытие состоит из корунда, оксида алюминия с кубической решеткой и с орторомбической элементарной ячейкой, в которой были обнаружены зерна с размером порядка сотен нанометров.

*Микродуговое окисление сплава АК4-1.* Аналогичные исследования сплаву Д16 были проведены и для АК4-1. В результате проведения экспериментов с применением 4-х факторного плана были получены следующие оптимальные характеристики покрытий: скорость роста износостойкого слоя – более 0,5 мкм/мин; микротвердость покрытия, измеренная на поперечном шлифе – более 2100 МПа; удельная электрическая прочность на пробой при отрицательной полярности до 20 В/мкм, а при положительной полярности – около 30 В/мкм, при величине напряжения пробоя более 2000 В.

Сравнение полученных результатов с параметрами МДО покрытия, сформированного на сплаве Д16 показало, что МДО сплава АК4-1 осуществляется при более высоких напряжениях. При этом, несмотря на то, что средняя толщина износостойкого слоя покрытия на сплаве АК4-1 уменьшились по сравнению со сплавом Д16 на 19%, но микротвердость значительно увеличилась, что позволило рассчитывать на более высокую износостойкость покрытия.

*Исследование МДО циркониевого сплава Э110.* Было проведено большое количество экспериментов на ИП конденсаторного типа с частотой синусоидального тока 50Гц в водных электролитах, состоящих из калиевой щелочи с концентрацией 0,5-8г/л и различных пассивирующих добавок, таких как  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{SiO}_3$ ,  $\text{NaAlO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ,  $\text{Na}_2\text{WO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{MoO}_4$ ,  $\text{Ca}_2(\text{H}_2\text{PO}_4)$  и т.д. в концентрации от 2 до 10г/л.

Было установлено, что существует ограничение по получению равномерного по толщине покрытия, связанного с достижением напряжения насыщения ( $U_{\text{нас}}$ ), после которого рост покрытия прекращается, и наблюдаются процессы продвижения границы «металл/оксид» вглубь образца с одновременным отслоением, ранее сформированного внешнего слоя покрытия, и сохранением его общей толщины. Поэтому процесс МДО в этих случаях ограничивался временем выхода на  $U_{\text{нас}}$ .

На следующем этапе исследований, была реализована матрица симплекс-вершинного плана с внутренними точками и общим центроидом. В качестве варьируемых факторов рассматривались концентрация  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ;  $\text{Na}_2\text{WO}_4$  и  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ . Для увеличения рассеивающей способности электролита, в него была добавлена щелочь КОН – 1г/л. Интервал варьирования всех трех компонент составлял от 0 г/л до 10 г/л. Образцы, представляли собой сегмент трубки Ø9,1мм разрезанной по образующей на 4 равные части длиной 60мм. Процесс МДО проводился в гальваностатическом режиме,  $j = 5 \text{ А/дм}^2$ ,  $t = 13$  мин (конец процесса при  $U_A = U_{\text{нас}}$ ),  $T=18\text{-}26^\circ\text{C}$ . Все МДО покрытия, полученные таким образом, показали в среднем увеличение коррозионной стойкости в 2 и более раз. Такие покрытия (тонкие) характеризовались толщиной  $\leq 10\text{мкм}$  и хорошей коррозионной стойкостью, но низким сопротивлением износу.

Поэтому для повышения износостойкости, дальнейшие исследования проводились с применением *суспензионных электролитов* с использованием конденсаторного и импульсного ИП. Основой такого электролита служил силикатно-щелочной электролит ( $C_{\text{KOH}}=0,5\text{г/л} + C_{\text{K}_2\text{SiO}_3}=10\text{г/л}$ ) с порошком  $C_{\text{Al(OH)}_3} = 20\text{г/л}$ . Для формирования покрытия использовался двух стадийный режим: в фазе быстрого роста напряжений (~5мин) поддерживался гальваностатический режим, затем, при выходе на монотонный рост напряжения формирования покрытия, регулирование плотности тока прекращалось, и процесс проводился в режиме падающей мощности.

Анализ зависимостей (рисунок 7) суммарного тока, анодного и катодного напряжений для выбранного электролита позволил выделить несколько областей процесса: 1 – стадия быстрого роста напряжения (до 5 минуты), 2 – стадия монотонного роста анодного и катодного напряжения (до 115 минуты), 3 – стадия падения анодного напряжения (~40В), при росте катодного (с 115 минуты до 121

минуты). 4 - стадия, характеризующаяся быстрым ростом анодного напряжения (70В) за 50 минут. 5 -стадия перехода в дуговую фазу МДО.

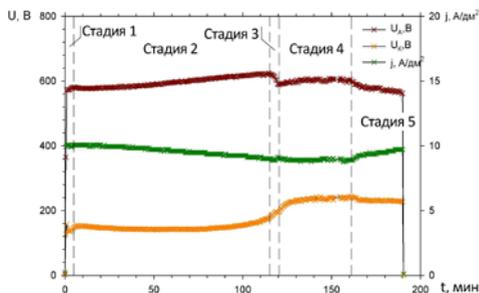


Рисунок 7 – Временная зависимость тока и напряжения в процессе МДО

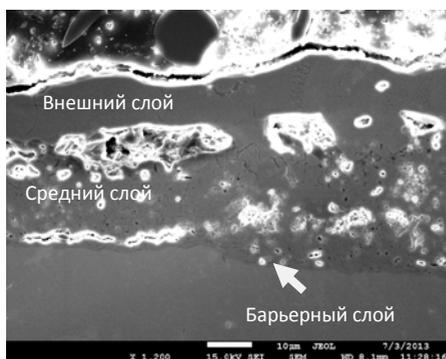


Рисунок 8 – Поперечный шлиф покрытия

Анализ этой зависимости позволил ограничить максимальное время процесса 160 минутами, а минимальное - 20 минутами, поскольку ниже этого значения были получены покрытия с низкой адгезией к подложке.

Изучение морфологии поперечных сечений покрытий на всех стадиях процесса показал, что переход через границу между 3-ей и 4-ой стадия сопровождается образованием более однородного покрытия (рисунок 8). Анализ элементного состава покрытий показал, что во всех случаях оно, в основном, состоит из атомов циркония и кислорода. Атомы алюминия регистрируются только во внешнем слое покрытий, но не более 3,5%. Методом РФА было определено, что количество тетрагональной фазы двуокиси циркония во всех покрытиях не превышает 17%. Коррозионные

испытания в автоклаве показали, что наилучшей коррозионной стойкостью, обладают более тонкие покрытия.

*Исследование изнашивания МДО покрытий.* Одной из важнейших задач, на первом этапе исследования изнашивания материалов, является определение границ фреттинга. Переход между фреттингом и классическим возвратно-поступательным изнашиванием определяется из условия:  $D = 2\delta_x = 2a$ , т.е. когда значение перемещения ( $D$ ) становится равным значению удвоенного диаметра пятна контакта ( $a$ ), которое, в свою очередь, определяется по теории Герца и зависит от механических свойств трущихся материалов. Кроме того, важным также представляется определение границы режимов фреттинга – частичного проскальзывания и полного скольжения, которая определяется экспериментальным путем с использованием критериев:  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $C_i$  и энергетического подхода в расчете петьль износа.

Такой подход позволил определить границы перехода между режимами фреттинга, т.е. построить карту фреттинга (рисунок 9), а также границу перехода от фреттинга к изнашиванию при возвратно-поступательном движении (рисунок 10).

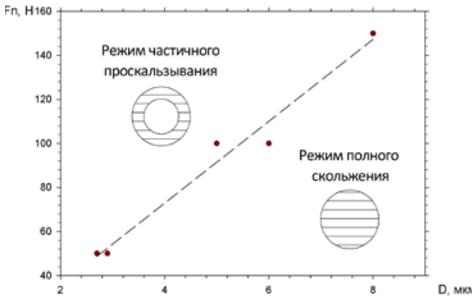


Рисунок 9 – Карта фреттинга

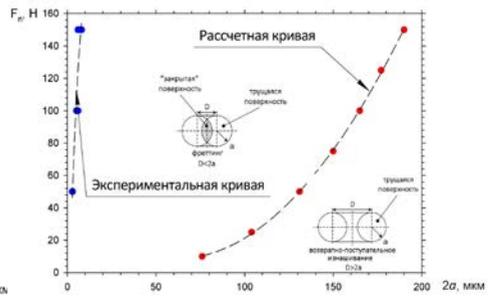


Рисунок 10 – Границы режимов изнашивания

При изучении структуры пятен износа, полученных в экспериментах с различными значениями перемещений ( $D = 3-500\mu\text{м}$ ) и нормальной нагрузки ( $F_n = 25-150\text{Н}$ ), а также с учетом измерения объемного износа ( $W_v$ ) были определены четыре основных типа изнашивания и построена карта износа:

- деформационный износ (в режиме частичного проскальзывания);
- микроабразивный износ (в режиме полного скольжения);
- межзеренное растрескивание;
- растрескивание покрытия, появляющееся после  $\sim 10^4$  циклов, после которого контртело достигает подложки.

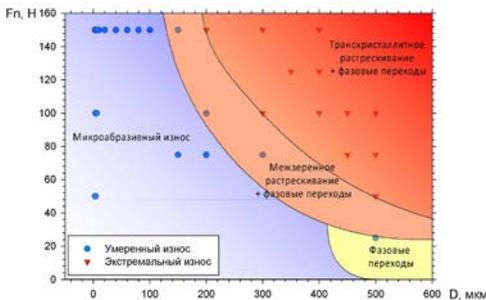


Рисунок 11 – Карта износа МДО покрытия на сплаве Д16

На рисунке 11 представлена карта износа в координатах нормальная сила ( $F_n$ ) и перемещение ( $D$ ), и отмечены области типов изнашивания.

Далее для анализа процессов изнашивания был использован энергетический подход, основанный на изучении петель износа - ( $F_{mp}-D$ ) (рисунок 3), позволивший рассчитать энергию, затрачиваемую за один цикл трения ( $E_{di}$ ), полную рассеиваемую энергию за весь эксперимент ( $E_d$ ), а также рассчитать средний коэффициент трения ( $\mu_s$ ) по следующим выражениям:

$$E_{di} = \sum_{j=1}^n F_{Tpij} D_j, \quad E_d = \sum_{i=1}^n E_{di}, \quad \bar{\mu}_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{E_{di}}{4D_i F_{Tpi}}$$

Построенная карта износа МДО покрытия (рисунок 12), позволила сделать вывод о существовании критической энергии в контакте, при которой происходит переход к экстремальному разрушению покрытия, и которая составила величину:

$$E_{\text{кр}} = 2\overline{\mu}_s F_{\text{нi}} D_i = 0,0061$$

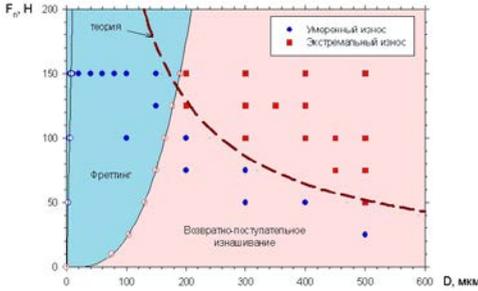


Рисунок 12 – Граница перехода в режим экстремального износа

По этой зависимости была построена граница перехода (пунктирная линия на рисунке 12) в экстремальный режим разрушения, не прибегая к проведению экспериментов по всей области нагрузок.

Выполненные исследования, таким образом, предоставили возможность *предсказывать значения износа трущихся тел* при различных режимах изнашивания.

Поэтому с учетом границ переходов между режимами изнашивания было рассмотрено выражение для энергетического коэффициент износа ( $\alpha$ ), который определяется как отношение объемного износа покрытия ( $W_v$ ) к полной рассеиваемой энергии ( $Ed$ ) за весь эксперимент в исследуемом контакте:

$$\alpha = \frac{W_v}{\sum_{i=1}^n E d_i}$$

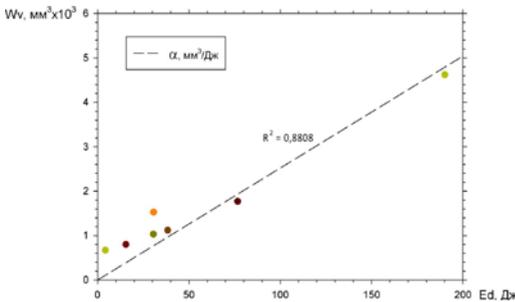


Рисунок 13 – Энергетический коэффициент объемного износа для МДО покрытия, сформированного на сплаве Д16

По полученному усредненному значению  $\alpha = 25 \times 10^{-6} \text{ мм}^3/\text{Дж}$  (пунктирная линия на рисунке 13), можно оценивать объемный износ покрытия при известной энергии, рассеиваемой в контакте за весь эксперимент, независимо от значений нормальной силы и перемещения. Определяя этот коэффициент и проводя энергетический анализ петель износа, в конечном итоге, можно рассчитать ресурс покрытия.

**В главе 5** приводятся результаты разработки и практической реализации опытных технологических процессов.

Для защиты от износа внутреннего диаметра  $42^{+0,027}$  стакана подшипника 38.07.00031 блока насосов 88П418 двигателя РД 33 серии 4 ОАО «ММП им. В.В. Чернышева», выполненного из сплава АК4-1, был разработан технологический процесс и определены оптимальные режимы формирования покрытия методом МДО.

В ходе эксплуатации насоса было установлено, что внутренний диаметр стакана в контакте со стальной внешней обоймой, вставляемого в него подшипника, быстро изнашивается, что приводит к перераспределению нагрузок в контактирующих поверхностях деталей насоса и преждевременному выходу его из строя.

С учетом требований предприятия, на внутренней стенке стакана было сформировано покрытие (рисунок 14) с использованием следующего режима:  $C_{кон} = 1$  г/л,  $C_{Na_2SiO_3} = 4,69$  г/л,  $C_{Na_2B_4O_7} = 5$  г/л, плотность тока  $j = 13$  А/дм<sup>2</sup>,  $T = 25^\circ\text{C}$ ,  $t = 240$  мин. Среднее значение микротвердости полученного покрытия составляло 2327МПа. На рисунке 15 представлен уровень поверхности, сформированного покрытия, относительно номинального уровня поверхности внутренней стенки стакана.



Рисунок 14 – Общий вид стакана подшипника с МДО покрытием

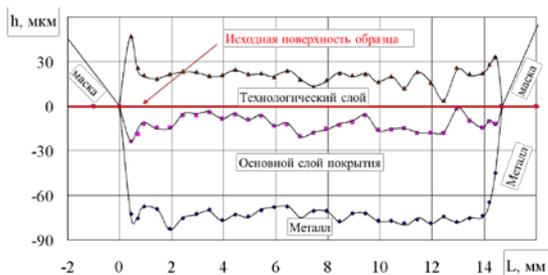


Рисунок 15 – Распределение толщин слоев МДО покрытия относительно базовой поверхности детали

Испытания на износостойкость были проведены на образце свидетеле на машине трения при следующих условиях: возвратно-поступательное движение в режиме полного скольжения; вид контакта - сфера ( $\varnothing 12,7$ мм, ШХ15)/плоскость (АК4-1 с покрытием); частота перемещения  $f = 20$  Гц; полное скольжение  $D = 350$  мкм; нагрузка на контакт  $F_n = 10$  Н; число циклов трения  $n = 10^5$ ; среда - воздух, масло И20 и ИПМ10. Результаты испытаний показали, что МДО покрытие не изнашивается в любых условиях эксперимента, а анодное покрытие, полученное по штатной технологии предприятия, изнашивается, в том числе и в среде масел.

Результаты трибологических испытаний подтвердили высокую износостойкость МДО покрытий, сформированных на оптимальном режиме, и были рекомендованы для защиты от износа внутреннего посадочного (под подшипник) диаметра  $42+0,027$ мм стакана 38.07.00031 блока насосов для последующего использования в опытно-конструкторских разработках предприятия.

По просьбе предприятия «УМПО ОКБ им. А. Люльки» были проведены сравнительные испытания масел – ИПМ10, ВНИИНП50-1-4У и ВНИИНП-1-4Ф, применяемых в маслоагрегатах ГТД АЛ31Ф и АЛ41Ф, по их способности к защите поверхностей в паре трения сфера (ШХ15)/плоскость (АК4-1 с покрытием и без).

Результаты проведенных испытаний (рисунок 16), показали преимущества по износу контактной пары в среде масла ИПМ10, по сравнению с ВНИИНП50-1-4У и ВНИИНП-1-4Ф, в результате чего предприятием было решено отказаться от масел

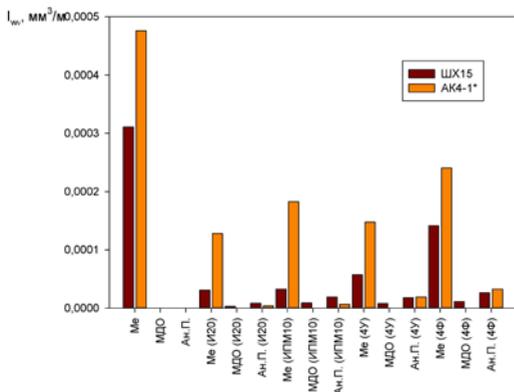


Рисунок 16 – Результаты испытаний по влиянию различных масел на интенсивность износа тел в паре трения

комбинированных энергоустановок на основе двигателей Стирлинга для использования их в составе КЛА

Для НПЦ «Трибоника» были проведены исследования возможности получения керамических покрытий из двуокиси циркония, содержащих в основном тетрагональную фазу. Для этого были проведены эксперименты с последовательным увеличением плотности тока на образцах из циркониевого сплава в водном растворе гипофосфита кальция и определен фазовый состав, полученных покрытий (рисунок 17) и таким образом подтверждена эта возможность.

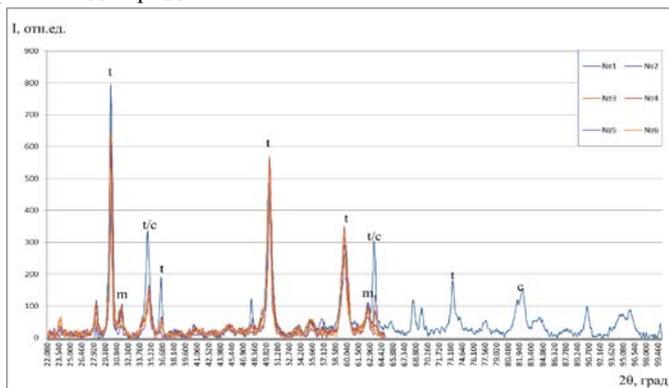


Рисунок 17 – Изменение фазового состава образцов в зависимости от режима МДО обработки

Полученные результаты были использованы в научных разработках НПЦ «Трибоника» при оценки формирования покрытия из двуокиси циркония заданного фазового состава на материале, полученном холодным газодинамическим напылением порошка циркония. Была также рассмотрена возможность

использования результатов диссертации при проектировании и разработке узлов трения с износостойкими покрытиями с использованием двуокиси циркония

Для использования в составе узла трения – подшипник скольжения узла разворота элементов холодильника излучателя (ХИ) космической энергетической установки (КЭУ) предприятия ОАО «Красная звезда», показанного на рисунке 18, были предложены результаты исследования износостойкости образцов из циркониевого сплава Э110 с МДО покрытиями.

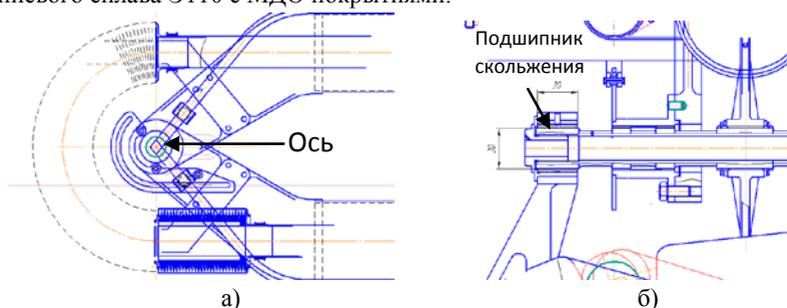


Рисунок 18 – Узел разворота элементов ХИ КЭУ: а) ось разворота элементов ХИ в сложенном состоянии, б) поперечное сечение узла разворота

Формирования износостойких МДО покрытий, в этом случае, проводилось с использованием импульсного ИП постоянного тока. Процесс МДО был реализован в водном растворе  $\text{NaAlO}_2$  – 28,7г/л в гальваностатическом режиме при  $j=10\text{А/дм}^2$ ,  $f = 100\text{Гц}$ ,  $D = 26\%$  (коэффициент заполнения),  $T=28^\circ\text{C}$  в течение 45мин. Для повышения трибологических свойств МДО покрытий были использованы два вида пропиток: силикатная, с использованием золь-гель технологии, и твердое смазочное покрытие МС2000™ наполненного частицами  $\text{MoS}_2$ .

Исследование изнашивания МДО покрытий проводилось по схеме цилиндр/цилиндр ( $\varnothing 9,1\text{мм}$ ) с  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\alpha$  – угол между образующими цилиндра. При значении перемещения  $D = \pm 100\text{мкм}$  в режиме возвратно-поступательного изнашивания с частотой  $f = 20\text{Гц}$ , в течение  $10^5$  циклов и нормальной нагрузке в контакте  $F_n = 5\text{Н}$ . Контртелом служил цилиндр из сплава Э110.

Применение пропиток позволило улучшить свойства МДО покрытий по ресурсу и коэффициенту трения ( $\leq 0,18$ ), а результаты исследования были использованы в разработке альтернативного варианта узла разворота ХИ КЭУ.

Результаты повышения коррозионной стойкости образцов из циркониевых сплавов при формировании на их поверхности МДО покрытий, а также результаты испытаний циркониевых сплавов без покрытий и с МДО покрытиями в условиях фреттинг-износа, были использованы в НИР «Института промышленных ядерных технологий» НИЯУ МИФИ и включены в научно-исследовательские отчеты работ, проводимых в рамках ФЦП «Национальная технологическая база» в 2010, 2011г.г., а также Государственного контракта Госкорпорации «Росатом» в 2012,2013г.г..

На все используемые результаты исследования получены акты внедрений, приложенные к диссертации.

В **заключении** формулируются следующие основные результаты работы:

1. На основании проведенного анализа литературных источников показано, что повышение износо- и фреттингостойкости элементов ДЛА и ЭУ является актуальной задачей. Для её решения обоснован выбор метода МДО, рассмотрен механизм процесса МДО и его технологические возможности.
2. С использованием математических методов планирования эксперимента определены режимы процесса МДО на алюминиевых сплавах, оптимальные составы электролитов и получены регрессионные зависимости выходных характеристик покрытий от режимных параметров технологического процесса.
3. Детально исследован процесс МДО на циркониевом сплаве Э110, позволивший определить особенности и механизм роста МДО покрытия, получены результаты по повышению коррозионной стойкости образцов. Показаны преимущества применения суспензионного электролита с использованием порошка  $Al(OH)_3$ .
4. Разработано оборудование и методики определения износа и фреттинг-износа МДО покрытий, с регистрацией силы трения и амплитуд взаимного перемещения трущихся тел для различных режимов механического изнашивания для заданных условий эксплуатации.
5. На основе проведенного анализа физического моделирования процессов изнашивания и фреттинг-изнашивания, разработаны методики построения карт износа и фреттинг-износа для композиционных МДО покрытий, сформированных на алюминиевых сплавах.
6. С использованием энергетического подхода к изучению процесса изнашивания определен критерий перехода из режима интенсивного разрушения МДО покрытия в экстремальный. Получен энергетический коэффициент износа, позволяющий прогнозировать объемный износ МДО покрытия при различных режимах нагружения.
7. Установлена взаимосвязь между разрушением композиционных МДО покрытий, сформированных на алюминиевых сплавах, и условиями нагружения для заданных условий эксплуатации
8. Для получения износостойких поверхностей элементов ДЛА и ЭУ на циркониевом сплаве с МДО покрытиями показаны преимущества комбинированной обработки с использованием пропиток.
9. Получены и внедрены в опытно-конструкторские разработки предприятий, занимающихся проектированием и изготовлением ДЛА и ЭУ, опытные технологические процессы и рекомендации по их применению для повышения надежности и ресурса элементов двигателей и энергоустановок.

По результатам работы опубликовано 8 статей в рецензируемых научных журналах и изданиях:

1. Лесневский Л.Н., Ляховецкий М.А., Тюрин В.Н., «Микродуговое оксидирование циркониевых сплавов, используемых в ядерных энергетических установках» // Электронный журнал «Труды МАИ», 2011. №43 (07 октября 2014г.). URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=24708>

2. Ляховецкий М.А., «Применение методов планирования эксперимента в изучении свойств покрытий, полученных методом микродугового оксидирования» // Научно-технический Вестник Поволжья, 2012. №6. - С. 298-302.

3. Борисов А.М., Востриков В.Г., Иванова С.В., Куликаускас В.С., Лесневский Л.Н., Ляховецкий М.А., Романовский Е.А., Ткаченко Н.В., Тюрин В.Н., «Исследование покрытий на циркониевом сплаве, полученных методом микродугового оксидирования, с использованием спектрометрии резерфордовского и ядерного обратного рассеяния» // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования, 2013. №5. - С.42-46.

4. Бойцов Б.В., Лесневский Л.Н., Ляховецкий М.А., Петухов Ю.В., Прусс Е.М., Трошин А.Е., Ушаков А.М., «Повышение надёжности алюминиевых пресс-форм путём защиты их от износа и коррозии методом микродугового оксидирования» // Проблемы машиностроения и надёжности машин, 2013. №6. - С. 45-53

5. Борисов А.М. Востриков В.Г. Иванова С.В. Лесневский Л.Н. , Ляховецкий М.А., Романовский Е.А., Савушкина С.В., Ткаченко Н.В., Тюрин В.Н., «Исследование формирования защитных покрытий методом микродугового оксидирования с использованием нанопорошков гидроксида Al и Ca» // Физика и химия обработки материалов, 2013. №3. - С.53-58

6. Borisov A.M., Vostrikov V.G., Ivanova S.V., Kuliskauskas V.S., Lesnevsky L.N., Lyakhovetsky M.A., Romanovsky E.A., Tyurin V.N., «The study of zirconium alloy coatings produced by microarc oxidation using Rutherford and nuclear backscattering spectrometry» // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2013. 7 (3). - pp. 437-441

7. Boitsov B.V., Lesnevskiy L.N. , Lyakhovetsky M.A., Petuhov Yu.V., Pruss E.M., Troshin A.E., Ushakov A.M., «Improving the Safety of Aluminum Press Molds by Protecting Them from Wear and Corrosion by the Microarc Oxidation Method» // Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2013. 42(6). - pp.479-485

8. Borisov A.M., Vostrikov V.G., Ivanova S.V., Lesnevsky L.N., Lyakhovetsky M.A., Romanovsky E.A., Savushkina S.V., Tkachenko N.V., Tyurin V.N., «Formation of Protective Coatings by Microarc Oxidation Using Aluminum and Calcium Hydroxide Nanopowders» // Journal of Inorganic Materials: Applied Research, 2014, 5(3). - pp.245-249