

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования
Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)

на правах рукописи



Николаев Илья Алексеевич

ПОВЫШЕНИЕ ФРЕТТИНГСТОЙКОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ
АППАРАТОВ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТВЕРДЫХ
СМАЗОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

2.5.15. - Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных
аппаратов

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Лесневский Леонид Николаевич
д.т.н., профессор

Москва - 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ФРЕТТИНГ- ИЗНАШИВАНИЕ В УЗЛАХ ТРЕНИЯ ДЛА И ЭУ.....	10
1.1 Базовые представления о фреттинг-изнашивании и методах защиты от него	10
1.2. Смазка при фреттинге и твёрдые смазочные покрытия.....	27
1.3. Обзор методов формирования ТСП и обоснование выбора плазменных методов	37
ГЛАВА 2. СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБ ОСНОВНЫХ ПРОЦЕССАХ ФРЕТТИНГ- ИЗНАШИВАНИЯ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ С ПОКРЫТИЯМИ.....	51
2.1 Анализ процессов контактного взаимодействия при фреттинге.....	51
2.1.1 Упругая модель фреттинга	51
2.1.2. Упругопластическая модель фреттинга.....	55
2.1.3. Анализ процесса фреттинг-изнашивания с использованием петель фреттинг-гистерезиса	57
2.1.4. Карты фреттинга. Энергетический подход к анализу процесса.....	61
2.2. Анализ фреттинг-изнашивания с использованием индекса скольжения	64
ГЛАВА 3. МАТЕРИАЛЫ, МЕТОДИКИ И ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ	67
3.1. Материалы образцов, модельные образцы.	67
3.2. Плазменные установки формирования ТСП	68
3.3. Оборудование и определение свойств материалов и покрытий.....	71
3.4. Оборудование и методики определения фреттингостойкости	73
ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ФРЕТТИНГ-ИЗНАШИВАНИЯ ТСП, ПОЛУЧЕННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ	81
4.1. Исследование фреттинг-изнашивания ТСП, осажденных в магнетронной распылительной системе (MPC).	81
4.2. Зависимости характеристик фреттинг-изнашивания ТСП, полученных методами CAD и PACVD.....	97
4.3. Анализ фреттингостойкости ТСП, сформированных методом микродугового оксидирования (МДО).....	106
4.4. Влияние графита и MoS ₂ в составе ТСП, полученных атмосферным плазменным напылением на их фреттингостойкость	117

4.5.Методика выбора ТСП, стойких к фреттинг-изнашиванию.....	126
ГЛАВА 5. ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	133
5.1.Результаты использования ТСП, полученных плазменным напылением, для замковых соединений вентиляторных лопаток ГТД.....	133
5.2.Применение и сравнительный анализ конструкционных противоизносных материалов и ТСП для защиты от износа узлов поворота лопаток направляющего аппарата компрессора ГТД....	137
5.3.Опытный технологический процесс и результаты применения МДО покрытий для защиты от заедания (схватывания) резьбовых соединений элементов системы обеспечения теплового режима (СОТР) космического аппарата (КА)	140
5.4.Опытный технологический процесс и технологическая оснастка формирования МДО покрытия на внутреннюю поверхность теплового насоса малого диаметра в СОТР КА.....	144
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	150
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	151
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	160
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	161
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	163
ПРИЛОЖЕНИЕ 4	164
ПРИЛОЖЕНИЕ 5	165
ПРИЛОЖЕНИЕ 6	166

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших проблем создания перспективных двигателей летательных аппаратов (ДЛА) и энергетических установок (ЭУ) является проблема повышения ресурса и надежности их элементов и узлов, и особенно тех узлов, которые работают в условиях трения и изнашивания. Развитие и приложения трибологии, как науки изучающей проблемы изнашивания, трения и смазки, применительно к решению этих проблем является важнейшей задачей современных двигателестроения и энергомашиностроения.

Уровень разработок в области конструкторско-технологических решений при создании новых и исследовании существующих узлов трения является одним из показателей эффективности элементов ДЛА и ЭУ, а результаты трибологических исследований, связанных с изучением различных механизмов изнашивания узлов трения в различных условиях эксплуатации, являются важнейшим показателем уровня этих разработок. Фреттинг-изнашивание является одним из распространённых, но недостаточно изученных видов изнашивания, которое служит причиной катастрофических отказов или потери функциональности во многих узлах трения. Фреттинг встречается во всех квазистатических нагрузках, подверженных вибрации, и, таким образом, касается многих элементов ДЛА и ЭУ. Фреттинг, как процесс разрушения контактирующих деталей, в значительной степени определяется механическими и термодинамическими свойствами их поверхностных слоёв, поэтому модификация этих поверхностных слоёв или их "замена" на фреттинг-стойкие слои покрытий, и в частности, слои твёрдых смазочных покрытий (ТСП), свойства которых могут значительно отличаться от свойств основного материала, позволяют надеется на повышение стойкости материалов к фреттинг-изнашиванию.

Вопросы повышения фреттингостойкости актуальны для многих узлов трения ДЛА и ЭУ. Так у воздушных реактивных двигателей (ВРД) к таким узлам относятся: замки лопаток вентилятора, компрессора и турбины, поворотные узлы направляющих аппаратов, система управления механизацией компрессора, бандажные полки лопаток, поворотные механизмы (тяги, гидроцилиндры), створки сопла, подшипники скольжения, лепестковые газодинамические подшипники и др. Для жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) явления фреттинга характерны для многочисленных пар трения в турбонасосных агрегатах (ТНА), в соединениях трубопроводов, в клапанах, в подшипниках, шестернях, в карданах и др. Для энергоустановок и двигателей, использующих ядерные реакторы, основным объектом фреттинг-изнашивания является контакт тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) с поверхностями дистанцирующих решеток (ДР), определяемый предварительным натягом при их сборке, который находится под воздействием гидродинамического и теплового возбуждения используемого рабочего тела реактора.

В настоящей работе с целью уменьшения фреттинг-изнашивания на основе анализа возможностей и перспектив, используемых и предлагаемых к использованию твёрдых смазочных покрытий, рассматриваются различные плазменные методы их нанесения, реализуемые в трёх различных средах: в вакууме, в жидкости (электролите) и в атмосфере. Из этих методов, как наиболее широко используемые в авиационно-космическом производстве, обоснованно выбраны для практической реализации: физическое и химическое осаждение из паровой фазы (physical vapour deposition - PVD и chemical vapour deposition - CVD), микродуговое окисление (micro arc oxidation - MAO) и атмосферное плазменное напыление (atmosphere plasma spraying - APS).

В связи с изложенным **актуальность темы настоящей работы** определяется: в научном плане - в научном плане - необходимостью развития и использования современных представлений о процессе фреттинг-изнашивания ТСП, определения и анализа экспериментально получаемых петель фреттинг-гистерезиса и энергетического подхода при исследовании процесса фреттинг-изнашивания покрытий, в практическом отношении - использованием плазменных технологий формирования ТСП, анализа их фреттингостойкости и практической реализации полученных результатов в элементах ДЛА и ЭУ.

Данная работа выполнялась в рамках: гранта РФФИ «Физическое моделирование фреттинг – износа покрытий и прогнозирование их ресурса с использованием энергетического подхода» (договор № 20-38-90118\20 от 31.08.2020); научно-исследовательской работы «Теоретическо-расчетные исследования авиационных двигателей нового поколения и экспериментальная отработка элементов конструкций» (договор МАИ с ОКБ им. А.Люльки филиал ПАО «ОДК-УМПО» № 242-3 от 20 ноября 2018г.); научно-исследовательской работы «Экспериментально -исследовательские работы в области формирования перспективных технологических и конструкторских решений и модернизации испытательной базы» (договор МАИ с ОКБ им. А.Люльки филиал ПАО «ОДК-УМПО» №58710-02050 от 5 октября 2020); научно-исследовательской работы «Сравнительные испытания антифреттингового покрытия на образцах» (договор МАИ с АО «ОДК-Авиадвигатель» № 17705596339190000540/МАИ/202 от 24 ноября 2020г.); госзадания «Методы математического и физического моделирования процессов формирования, ускорения многофазных потоков и потоков заряженных частиц, их взаимодействия с поверхностями с целью исследования и создания перспективных двигателей летательных аппаратов нового поколения» №FSFF-2020-0014

Степень разработанности темы. Вопросам исследования явления фреттинга и фреттингостойкости рабочих поверхностей пар посвящено большое количество теоретических и экспериментальных работ. Среди авторов отечественных работ наиболее важный вклад в

разработанность темы внесли: В.С. Иванова, И.А. Одинг, И.В. Крагельский, Г.Н. Филимонов, Н.Л. Голего, А.Я. Алябьев, В.В. Шевеля, Б.И. Костецкий, А.Н. Петухов, Ю.Н. Дроздов, А.М. Смыслов, среди зарубежных авторов: Г.А. Томлинсон, Р.Б. Уотерхауз, Р.Д. Миндлин, Ф.П. Боуден, Д. Тейбор, С. Фоуври, Ф.Капса, Л. Винсент, О.Вингсбо и др.

Несмотря на большое количество работ, явление фреттинг-изнашивания в элементах ДЛА и ЭУ недостаточно изучено. Проблемы проектирования, формирования и применения твёрдых смазочных покрытий (ТСП) для повышения фреттингостойкости элементов ДЛА и ЭУ недостаточно исследованы, не в полной мере изучены процессы, особенности и условия фреттинг-изнашивания, недостаточно разработаны опытные технологии и не определены материалы и конструкции ТСП, соответствующих разнообразным условиям их эксплуатации в составе ДЛА и ЭУ.

Объект исследования: процесс фреттинг-изнашивания твёрдых смазочных покрытий, предназначенных для защиты элементов узлов трения ДЛА и ЭУ.

Предмет исследования: методика экспериментальной оценки и исследования фреттинг-изнашивания ТСП, сформированных различными плазменными методами, с целью повышения фреттингостойкости узлов трения ДЛА И ЭУ.

Цель исследования: повышение фреттингостойкости элементов ДЛА и ЭУ с использованием твёрдых смазочных покрытий.

Задачи исследования:

1. Анализ процесса фреттинг-изнашивания и обоснование выбора твёрдых смазочных покрытий и плазменных методов их формирования для защиты от фреттинг-износа.
2. Исследование фреттинг-изнашивания ТСП, полученных плазменными методами, с использованием петель фреттинг-гистерезиса, энергетического подхода и построением карт фреттинга.
3. Разработка обобщенной методики исследования фреттинг-изнашивания ТСП для задаваемых условий эксплуатации.
4. Практическое использование исследованных ТСП для повышения фреттингостойкости и износостойкости элементов ДЛА и ЭУ.

Научной новизной обладают следующие результаты:

1. Использование петель фреттинг-гистерезиса к разработанным ТСП с целью определения энергии диссипации в контактах трения и преобладающих механизмов изнашивания в зависимости от условий их работы.
2. Для ТСП, сформированных методами плазменных технологий, впервые получены коэффициенты и индексы скольжения, энергетические коэффициенты, коэффициенты объемного износа рекомендуемых покрытий, и построены карты фреттинга.
3. Разработана и применена к элементам пар трения ДЛА и ЭУ методика выбора ТСП, стойких к фреттинг-изнашиванию.
4. Подтверждена на практике работоспособность и фреттингостойкость разработанных ТСП.

Теоретическая и практическая значимость результатов исследования.

1. С использованием развитого энергетического подхода, карт фреттинга, значений коэффициентов и индексов скольжения разработана методика определения преобладающих механизмов взаимодействия трущихся тел с ТСП, работающих в условиях фреттинг-изнашивания.
2. Полученные результаты позволили проводить оценку свойств и характеристик формируемых ТСП на этапах обоснования выбора твёрдых смазочных материалов, плазменных методов их нанесения и проектирования систем покрытий, что составляет практическую значимость проведённого исследования.

Методология и методы исследования.

Результаты работы получены при комплексном использовании аналитических и экспериментальных методов исследования. Выбор материалов ТСП осуществлялся на основе проведения испытаний на фреттинг-изнашивание в условиях сухого трения и приближенных к реальным по скорости и величинам относительного перемещения, нагрузке, форме контактов, материалов контртел и т.д. с использованием специализированных машин трения. Применение таких машин трения вместо повсеместно используемых универсальных, позволило моделировать реальные условия эксплуатации пар трения с программируемой обработкой результатов измерений, что является важным элементом настоящего исследования.

Достоверность результатов исследования обеспечена:

- совпадением аналитических оценок и экспериментальных данных при определении и сравнении энергий диссипации в зоне контактов трения применительно к ТСП, полученным различными плазменными методами их формирования: магнетронному осаждению, осаждению с использованием вакуумной дуги, химическому осаждению с плазменным сопровождением в вакууме, микродуговому оксидированию и плазменному напылению;
- корректным использованием методов математической статистики при обработке результатов экспериментальных исследований;
- проверке полученных результатов в конкретных изделиях и решениях технических задач согласно актов использования, полученных от внешних организаций.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты анализа фреттингостойкости, с оценкой по петлям фреттинг-гистерезиса энергии диссипации ТСП, их коэффициентов и индексов скольжения и с использованием энергетического подхода.
2. Обоснование выбора материалов и конструкций ТСП для обеспечения защиты от фреттинг-изнашивания и методов их формирования с использованием плазменных технологий.
3. Оценка фреттингостойкости ТСП, разрабатываемых для использования в узлах трения ДЛА и ЭУ и получаемых методами плазменных технологий в вакууме, в жидкости (электролите) и в атмосфере.
4. Методика выбора ТСП, стойких к фреттинг-изнашиванию.
5. Результаты практической проверки в лабораторных условиях и на реальных изделиях опытно-технологических процессов получения и оценки свойств ТСП для защиты от фреттинг-изнашивания элементов ДЛА и ЭУ.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих международных и всероссийских научно-технических конференциях: 14-я Международная конференция «Пленки и покрытия (Санкт-Петербург, 2019 г.); 20-я Международная конференция «Авиация и космонавтика» (Москва 2021г.); XXII Научно-техническая конференция учёных и специалистов, посвященная 60-летию полета Ю.А. Гагарина, 75-летию ракетно-космической отрасли и основания ПАО «РКК «Энергия» (Москва, 2021г.); XLV, XLVIII Международные молодёжные научные конференции «Гагаринские

чения» (Москва, 2019, 2022г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 работ, из них в рецензируемых научных изданиях и изданиях, приравненных к ним опубликовано 4 работы.

Вклад автора в проведение исследований.

В расчётно-аналитическую часть работы: разработка методики определения механизмов взаимодействия трущихся тел с использованием петель гистерезиса, оценки энергий диссипации; связи этих механизмов с коэффициентом и индексом скольжения; разработка методики получения карт фреттинга применительно к сплавам, используемым в ДЛА и ЭУ, с ТСП для выбранных условиях эксплуатации.

В экспериментальную часть работы: личное участие в постановке и проведении всех экспериментальных исследований фреттингостойкости ТСП, в модернизации специализированных машин трения, в обработке и анализе полученных экспериментальных данных, в передаче результатов заказанных исследований во внешние организации.

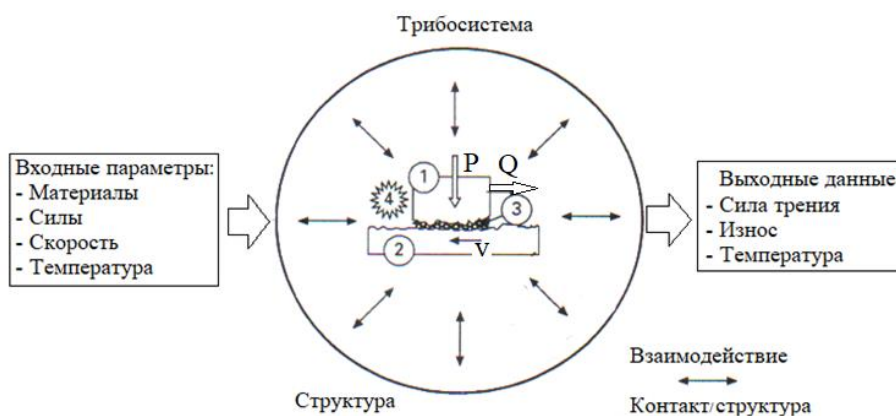
Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 133 наименований и 6 приложений. Общий объём диссертации составляет 166 страниц (включает 132 рисунка, 23 таблицы и 6 приложений).

ГЛАВА 1. ФРЕТТИНГ- ИЗНАШИВАНИЕ В УЗЛАХ ТРЕНИЯ ДЛА И ЭУ

1.1 Базовые представления о фреттинг-изнашивании и методах защиты от него

Ресурс работы многих узлов трения ограничивается износом или разрушением контактирующих деталей вследствие развития процесса фреттинга при колебательном относительном движении контактирующих поверхностей (от английского fret – разъедать, подтачивать). Процесс фреттинга возникает как при постоянном контакте деталей при их эксплуатации (прессовые посадки, замковые, болтовые, фланцевые соединения и др.), так и при периодически вступающих в контакт (шариковые подшипники, шарнирные соединения, регуляторы, клапаны и т.п.) [1,2].

Трибология как междисциплинарная наука, изучающая относительное движение между двумя поверхностями, включает в себя три компонента: смазку, трение и износ. Последние несколько десятилетий трибология перешла от трибологии объемов, основанной на предположении, что трение и износ являются только внутренними свойствами материалов (поэтому законы трения и износа были разработаны сначала для различных комбинаций материалов), к трибологии поверхностей, в которой уже основное внимание уделяется инженерии контактирующих поверхностей, к трибологии интерфейсов, представляющих собой границы раздела между двумя контактирующими деталями, определяющими их свойствами и характеристиками их взаимодействия [3]. Изучение и исследование разнообразных механизмов изнашивания, зависит, в общем виде, от входных и выходных параметров трибосистемы, общий вид которой показан на рис.1.1.



1 и 2 – два контактирующих тела; 3 - межфазное тело или третье тело; 4 - представляет среды
(P - нормальная сила, Q - тангенциальная сила, v - скорость скольжения)

Рис. 1.1. Основные компоненты трибосистемы [3].

При действии механизмов изнашивания приложенные нагрузки приводят к химическим и металлургическим превращениям как на поверхности, так и под поверхностью контактирующих тел. Эти тела разделены интерфейсом (естественным или искусственно созданным), который

возникает в начальный период приработки. Образующиеся при трении продукты износа – «мусор» обеспечивают разделение двух первых тел и получили название «третьего тела», структура и состав которого, в дальнейшем, меняются в результате химической реакции с окружающей средой за счет энергии, рассеиваемой на этой границе раздела.

Срок службы контакта трения определяется: износом (потерей объёма) двух первых тел и удалением материала из области интерфейса с формированием частиц износа вне зоны контакта. Возможна и другая ситуация (низкого износа), когда два первых тела изнашиваясь до предела, образуют стабильное межфазное (третье) тело, препятствующее выбросу частиц износа из зоны интерфейса благодаря своим механическим свойствам и прилипанию частиц износа к первым двум телам. При этом все классические виды износа адгезионный износ, абразивный износ, эрозионный износ, усталостный износ и коррозионный износ, описания которых и основные приложения даны в Таблице 1 [4], будут присутствовать в контакте трения.

Таблица 1. Виды износа и их характеристики [4]

Вид износа	Описание механизма	Приложения
Адгезионный износ	Происходит, когда неровности на скользящих поверхностях взаимодействуют в виде холодной сварки. Характеризуется высоким коэффициентом трения и присутствием частиц материала в следе износа (контакты металл-металл)	Шариковые подшипники, несмазанные и плохо смазанные, металлические контакты.
Абразивный износ	Встречается, когда один из скользящих материалов тверже чем другое тело (как правило >20%). Повреждения проявляются в виде регулярного рисунка из царапин. Имеет место в комбинациях: керамика-металл, полимер-металл. Типы: абразивный износ двух тел, износ трех тел, когда частицы износа обдирают мягкие поверхности.	Двигатели внутреннего сгорания: юбки поршня, цилиндры поршня, зубчатые колёса
Эрозионный износ	Происходит, когда твердые частицы или капли жидкости падают на поверхность, повреждение которой происходит в результате передачи импульса. Величина износа пропорциональна скорости частиц, углу удара и плотности разрушаемого материала. Встречается эрозия частицами и жидкая (каплями).	Компрессоры. Турбины: газовые, паровые, гидроэлектрические
Усталостный износ	Происходит, когда материалы подвергаются различным циклическим нагрузкам. Повреждения происходят, например, при фреттинге в контактах, когда при небольших амплитудах перемещения контакт вибрирует с большой частотой. В результате появляются трещины, развивающиеся преимущественно в процессе износа.	При слабом прессовом соединении колец и вставок подшипников и сборки валов. Вибрации в замках лопаток, на бандажных полках, в болтовых и шлицевых соединениях и др.
Коррозионный износ	Коррозионный износ в трибологии, известный также как трибокоррозия, наблюдается на деталях, когда при скольжении на чистую поверхность воздействует окружающая коррозионная среда. Эта среда ускоряет деградацию материала, поскольку он подвергается совместному механическому и химическому воздействию.	Газовые турбины, авиационные или промышленные камеры сгорания, сопла. Фреттинг химически активных материалов

Говоря об износе поверхностей контакта трения, уместно на основании вышеизложенного считать, что анализ этих базовых механизмов износа, действуя по отдельности или в различных

сочетаниях, позволяют дополнительно выделить такой вид износа, как фреттинг-износ, который, согласно [5], отличается такими свойствами, как:

- явление фреттинг-износа, возникающее между двумя поверхностями, имеющими колебательные относительные движения малой амплитуды; при этом часто используемые термины фреттинг-коррозия, фреттинг-усталость не рекомендуется использовать, т.к. это похожие, но отличающиеся явления, и поэтому фреттинг-износ (fretting wear-FW) удобнее рассматривать как фреттинг, для которого смещения являются следствием внешних вибраций, а фреттинг-усталость (fretting fatigue-FF) как небольшие смещения, являющиеся следствием (циклической) деформации одного из двух контактирующих тел, а фреттинг-коррозию (fretting corrosion-FC) следует использовать, если в зоне контакта преобладают химические реакции;
- малая амплитуда колебательного движения, обычно тангенциального, между двумя соприкасающимися поверхностями твердых тел (здесь термин фреттинг относится только к характеру движения без учета износа, коррозии или других повреждений, которые могут наступить).

Классическая трибология часто тесно связана с действующими в контакте трения механизмами износа. Трибология интерфейса или трибология третьего тела [5] разделяет процесс изнашивания на следующие этапы, которые могут происходить одновременно:

- отделение частиц: частицы износа отделяются от первых двух тел, т.е. от исходных соприкасающихся поверхностей любым из (приведенных выше) механизмов (адгезия, абразивный износ, коррозия, поверхностная усталость и др.);
- жизнь третьего тела: после отрыва захваченная частица подвергается напряженным условиям воздействия на границе раздела со стороны других частиц, так эти частицы, образуя «мусор», становятся частью «третьего тела» и меняются как по морфологии, так и по составу;
- циркуляция мусора: в зависимости от многих параметров, связанных с характером контакта, таких как вибрации или влажность, частицы могут попасть в контакт, рециркулировать или могут быть удалены;
- выброс (удаление) частиц, когда наконец, частицы износа выбрасываются как из пятна износа, так и из контакта (в этом случае рециркуляция исключена) и только тогда они становятся «настоящими» частицами износа.

Таким образом, третье тело – это «среда», через которую передается нагрузка от одного тела к другому, а формирование и устранение третьих тел представляет собой задачу своеобразного «потока», у которого имеются источники и стоки, и в этом случае можно провести сильную параллель между использованием смазки и износом [6].

Рассматриваются различные фундаментальные явления, используемые при описании поверхностных повреждений при фреттинге, такие как трещины, пластическая деформация, адгезия и физико-химические превращения, как показано на рис. 1.2, и любое моделирование износа в той или иной степени старается учитывать эти явления.

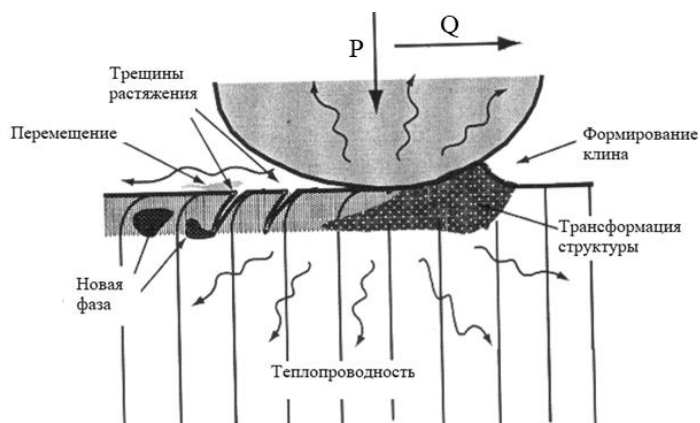


Рис. 1.2. Различные явления в контакте скольжения шара по плоскости [6]

Принято рассматривать различные виды фреттинга, так при рассмотрении контакта шара с плоскостью можно выделить различные его виды в зависимости от характера относительного движения (рис.1.3). Все эти виды можно встретить в практических приложениях, но чаще всего встречается тангенциальный фреттинг.

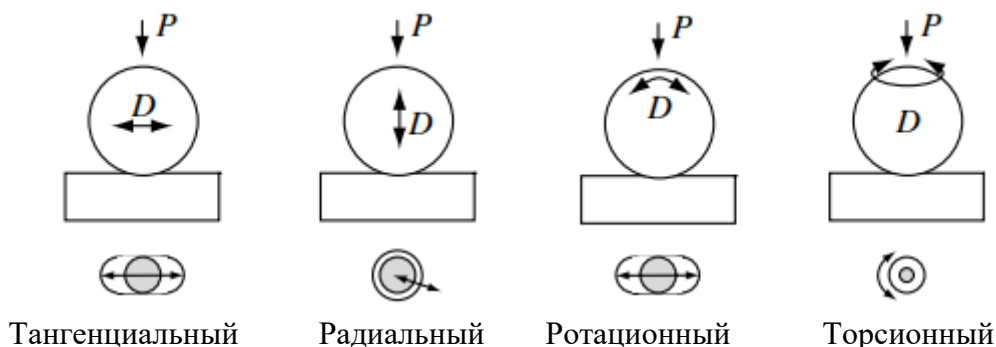


Рис.1.3. Схемы четырёх основных видов фреттинга для контакта шар/плоскость [6]

Обычно фреттинг повреждения описываются как:

- износ, вызванный фреттингом (wear induced by fretting-WIF) – соответствует классической потере материала (рис. 1.4);

- растрескивание, вызванное фреттинггом (cracking induced by fretting-CIF) – трещины, возникающей на поверхности, трещины могут распространяться до окончательного разрушения образца (рис. 1.5).

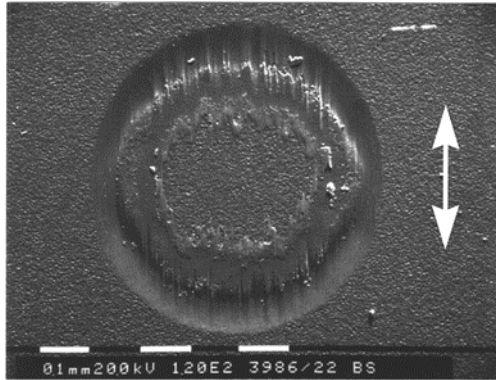


Рис.1.4. SEM-изображение следа износа, показывающее потерю вещества при испытании шариком на плоскости при фреттинге [6]

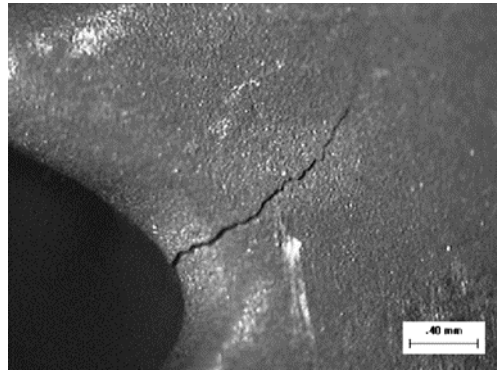


Рис. 1.5. Усталостная трещина, распространяющаяся после зарождения из-за контакта корня типа «ласточкин хвост» в авиационном двигателе [6]

Традиционно WIF связывают с наличием порошка износа (обломков). Для широкого спектра металлов, сплавов условия фреттинга WIF поэтапно описываются следующим образом: удаление поверхностных оксидных слоев и увеличение контакта металла с металлом; формирование новой микроструктуры, называемой трибологически преобразованной структурой (tribologically transformed structure-TTS) в случае изначально нехрупких материалов; TTS в этом случае представляет собой нанокристаллическую структуру, которая становится слишком хрупкой, не может приспособиться к приложенному смещению и приводит к разрушению (поломке); захватывание металлического «мусора», его измельчение и окисление при контакте, что приводит к образованию порошкового слоя - третьего тела; действие третьего тела зависящее от возможности удаления «мусора» (т.е. от характера и формы обломков и вибрирующей среды); если «пуховая постель» из материала трения тела поддерживается в

контакте, объемное разрушение (деградация) может быть остановлено, поскольку скорость изнашивания теперь полностью определяется этой «постелью» [6].

Для условий фреттинга СІF наблюдаются следующие характерные особенности растрескивания на контактной поверхности: т.е. на каждой стороне контакта трения сначала зарождается несколько мелких трещин (по ходу фрикционного движения), а затем с каждой стороны может образоваться магистральная трещина, которая уже и приводит к выкрашиванию; трещины могут образовываться и распространяться в любом месте контактной поверхности и часто это вызывает образование грубых обломков или сколов, но обычно это случается только у внешних, выходящих на поверхность, трещин.

Потеря материала (износ) и растрескивание иногда проявляется как конкурирующие процессы, и теряемый при износе материал при этом может устранить небольшие поверхностные трещины или глубокую трещину, и тем самым, приспособившись к основной части прикладываемого смещения, сильно уменьшить амплитуду проскальзывания, а затем и образование «мусора» [6].

В аэрокосмических отраслях промышленности износ вибрирующих компонентов из высокопрочных сплавов низкой плотности является критической проблемой, которая может привести к катастрофическим разрушениям. На рис. 1.6 показана схема газотурбинного двигателя с обозначением мест, где наблюдаются явления фреттинг-износа, фреттинг-усталости и фреттинг-коррозии [7].

Как следует из этого рисунка, довольно большое число компонентов ГТД подвержено фреттингу. Это в первую очередь связано с особенностями конструкции таких двигателей, в которых необходимо обеспечить высокоэффективное преобразование энергии при минимально возможном весе. Это приводит к высоким упругим деформациям в сопряжениях при знакопеременном, колебательном характере нагрузок, которые приводят к относительным перемещениям контактных поверхностей с разными механическими свойствами.

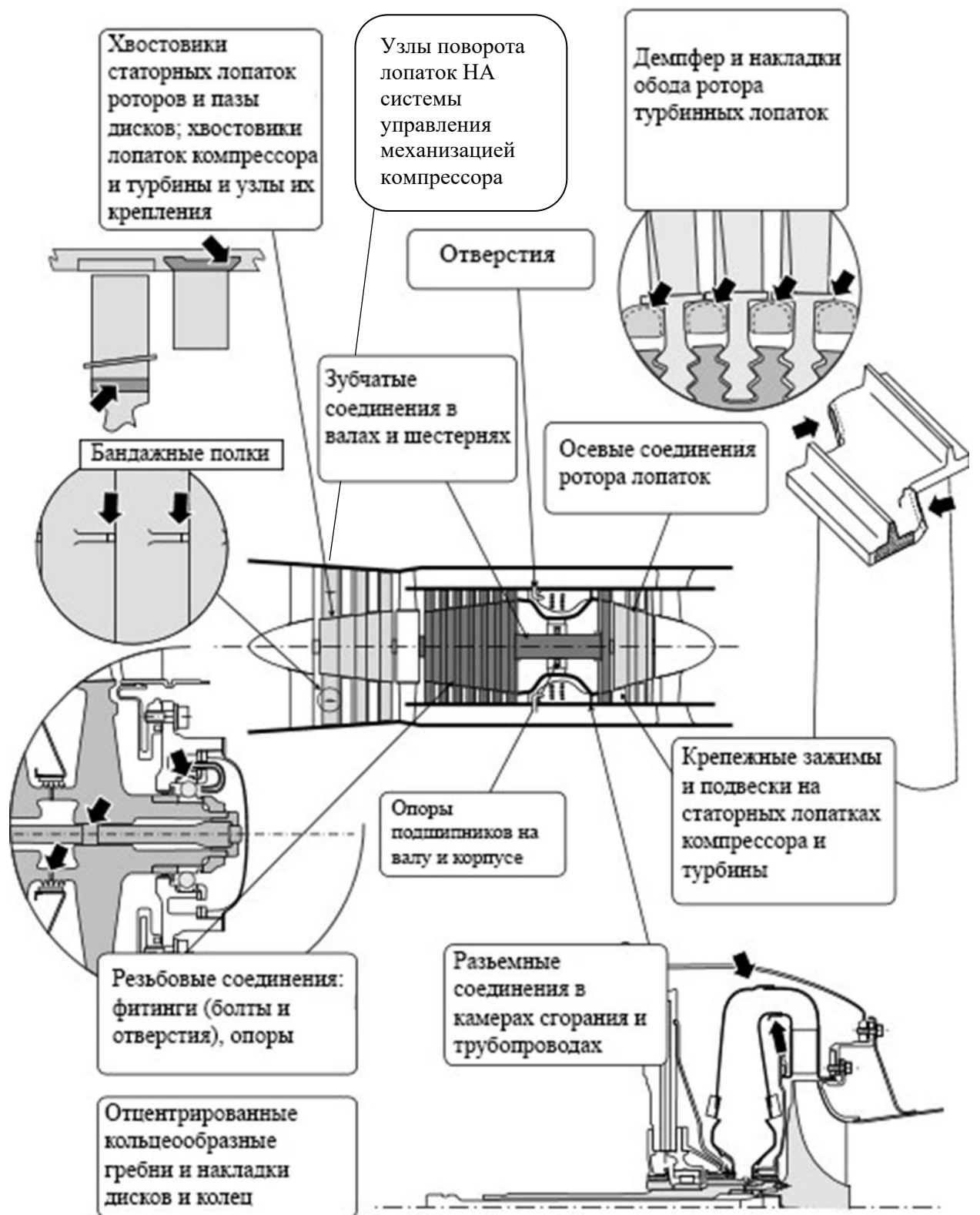


Рис. 1.6. Типичные зоны фреттинга в газотурбинном двигателе [7]

Конкретные примеры возникновения и развития разрушений элементов ГТД подвергнутых фреттинг-изнашиванию и фреттинг-усталости представлены на рис.1.7. [2].

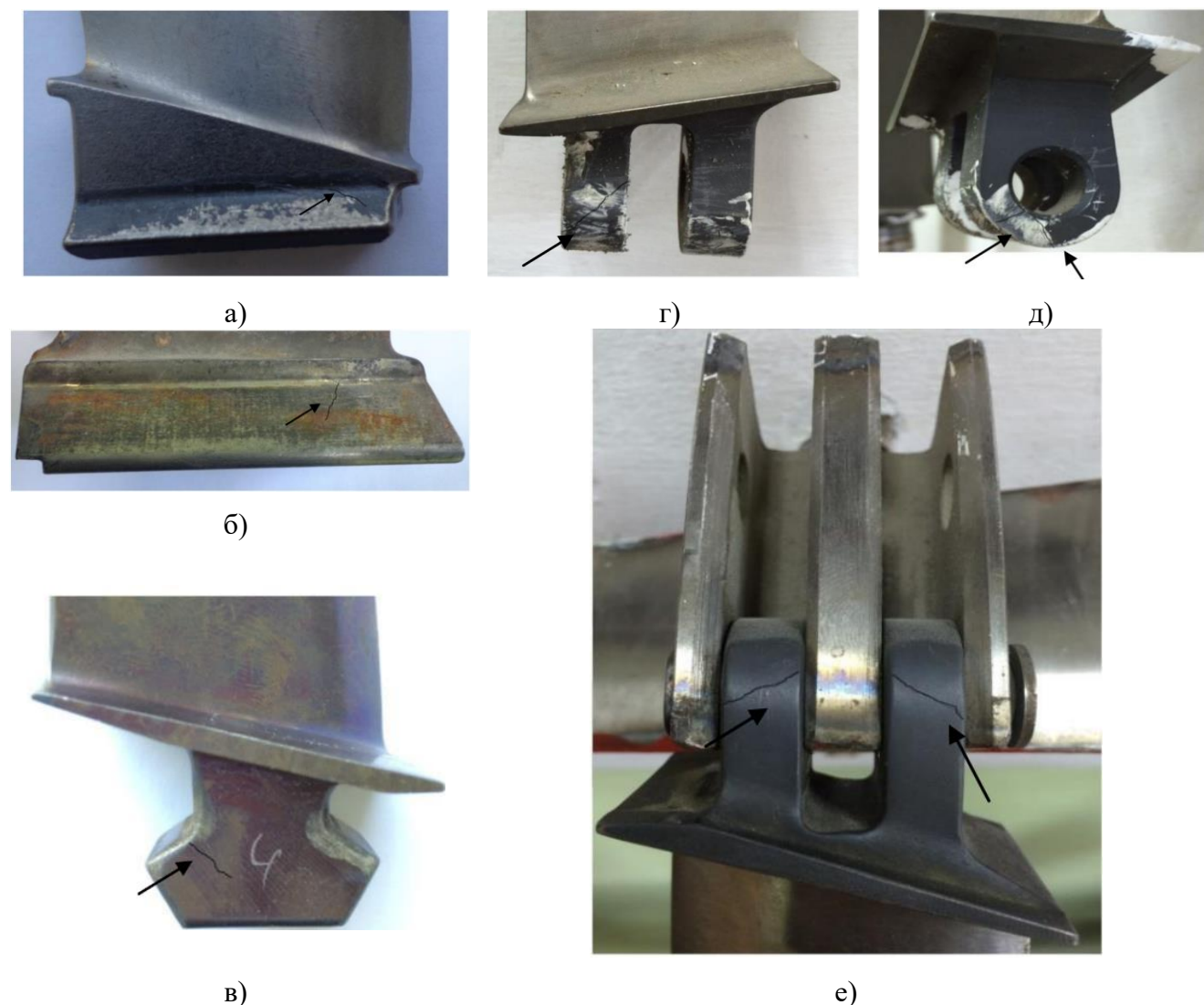


Рис.1.7. Примеры типичных разрушение замковых соединений типа «ласточкин хвост» и шарнирных замковых соединений лопаток [2].

Разрушение от фреттинга вала-шестерни редуктора показано на рис.1.8. Очаги развития усталостных разрушений и трещин наблюдаются на поверхности стыка фланца и шестерни (рис.1.8 а), на поверхности отверстий под стяжные болты в зоне контакта с шестерней и внутри отверстия в зоне контакта с болтом (рис.1.8 б), на рабочей поверхности стяжных болтов (рис.1.8 в).

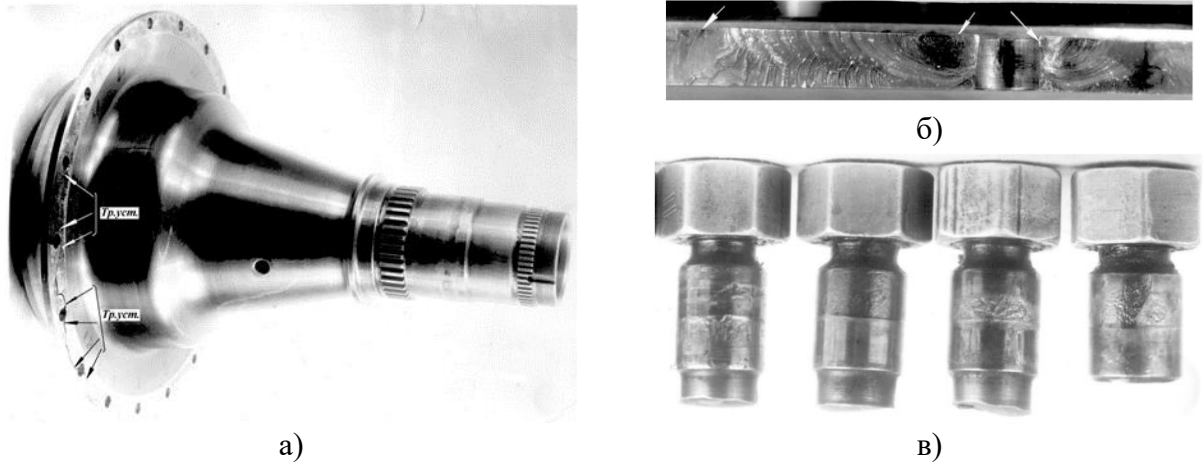


Рис.1.8. Разрушение от фреттинга вала-шестерни редуктора и втулки НА с очагами расположения фреттинг-повреждений (стрелками указаны очаги разрушений) [2].

В работе [8] представлены типичные примеры усталостных разрушений в результате фреттинг-повреждений в компонентах летательных аппаратов, изготовленных из $(\delta+\beta)$ титановых сплавов, а именно Ti-6Al-4V и Ti-2,5Al-2V. Известно, что титановые сплавы подвержены фреттинг-повреждениям в типичных условиях эксплуатации при контакте как однородных, так и разнородных металлов. Под влиянием наложенных вибраций фреттинг-повреждения в таких компонентах вызывают преждевременные усталостные разрушения.

На рис.1.9 показано усталостное разрушение болта вилки лопасти несущего винта вертолета. В районе головки болта (рис.1.9 а) при послеполетном осмотре обнаружена трещина (рис.1.9 б) после 143,3 часов работы. Болт изготовлен из титанового сплава Ti-6Al-4V.

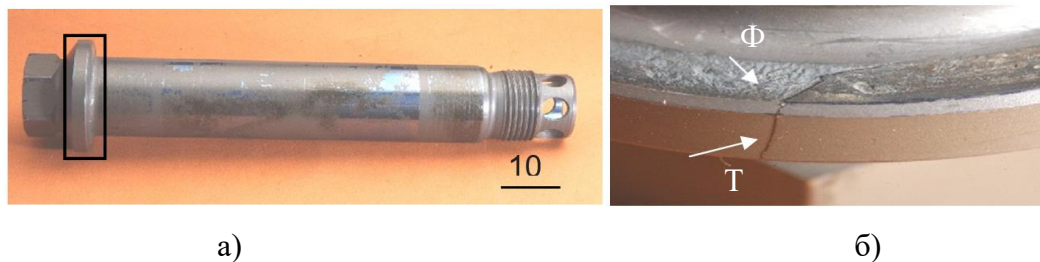


Рис.1.9. Разрушение болта вилки лопасти несущего винта вертолета [8].

Крупный план трещины болта (на рис. 1.9 б) на фланцевой поверхности позволяет установить, что фреттинг-повреждение расположено вблизи образовавшейся трещины.

Фрактограмма СЭМ (рис.1.10а) показывает след основной прогрессирующей трещины, развивающейся на поверхности кромки фланца, а (рис.1.10 б, в) язвенные и подповерхностные трещины, наблюдаются в нескольких местах вдоль кромки поверхностей излома и в области фреттинг-изнашивания на фланце болта. Таким образом было установлено, что причиной возникновения усталостных трещин является концентрация напряжений, связанная с

подповерхностными трещинами, возникающими из-за фреттинг-повреждений на границе фланца и втулки.

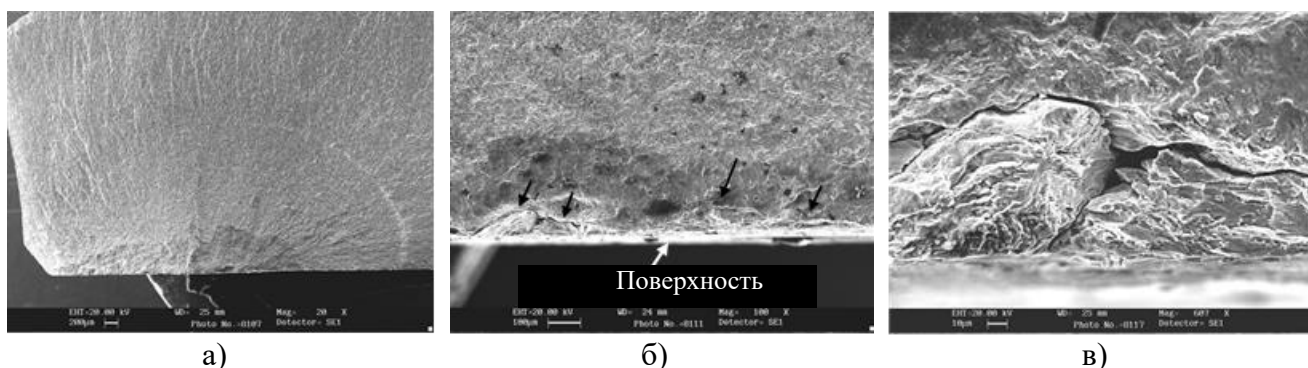


Рис.1.10. Сэм фотографии, показывающие прогрессирующее распространение основной и подповерхностной трещины (отмечены черными стрелками)

На рис.1.11а показано обжимное соединение коленчатого фитинга, изготовленного из чистого титана, внутри которого в трубопроводе, изготовленном из сплава Ti-2,5Al-2V, была обнаружена трещина (рис.1.11 б), ставшая причиной падения гидравлического давления в системе.



Рис.1.11 Обжимной концевой фитинг гидравлической системы с трещиной в трубопроводе под фитингом (удален) [8]

При осмотре поверхности трубы над участком, прилегающем к трещине, обнаружена неглубокая борозда (рис.1.12а). Под микроскопом в этой области было обнаружено отслоение материала (рис.1.12б) и поверхностная точечная коррозия, представляющая собой типичные признаки фреттинг-повреждения.

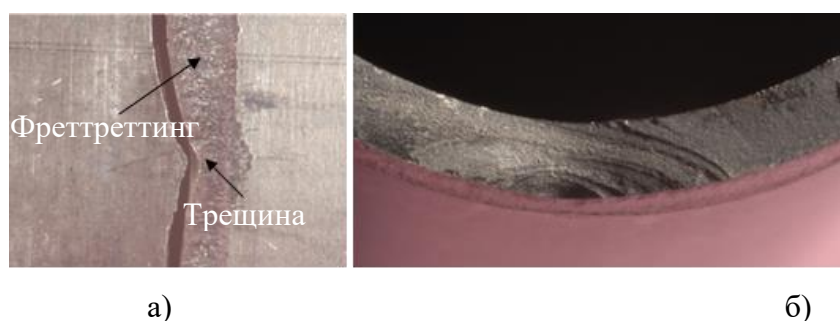


Рис.1.12 Изображение фреттинг-повреждения и трещины на краю поврежденного участка [8].

Фрактографическое исследование подтвердило, что узел трубы вышел из строя из-за фреттинг-усталости. Авторы [8] утверждают, что поскольку при сборке труб изгибающие напряжения неизбежны, то, как только усталостная трещина инициируется, ее распространение под действием переменных напряжений, наложенные на изгибные напряжения, происходит с большой скоростью. В данном случае преждевременному зарождению усталостной трещины в трубе способствовало истирание поверхности трубы из-за неправильного обжатия концевой фитинга.

В работах [2,8] приводятся и другие примеры возникновения повреждений деталей двигателей из-за фреттинг-изнашивания, показанных на рис.1.13. На этом рисунке показаны примеры фреттинг-изнашивания втулок узла поворота лопаток направляющего аппарата системы управления механизацией компрессора (рис.1.13а), радиально-упорного шарикоподшипника (рис.1.13 б) и наружного кольца двухрядного цилиндрического роликового подшипника (рис.1.13 в).



Рис.1.13. Примеры фреттинг-изнашивания колец подшипников [8].

Фреттинг-изнашивание рабочих поверхностей шлицевого соединения показано на рис.1.14.



Рис.1.14. Фреттинг-изнашивание шлицов [8].

Можно привести еще много примеров, иллюстрирующих фреттинг-повреждения в двигателе, согласно рис.1.7-1.14, но уже из приведенных примеров ясно, насколько широко распространено это явление и опасно в ответственных узлах разнообразных контактов и пар трения, значительно влияя на снижение прочности, надежности и ресурса изделия в целом.

Таким образом, фреттинг-изнашивание представляет собой особую форму изнашивания, которая по условиям возникновения и характеру проявления в ДЛА и ЭУ имеет следующие отличия от обычного изнашивания, реализуемого при однонаправленном скольжении [1]:

- вследствие малой амплитуды смещений удаление продуктов изнашивания из зоны трения затруднено, и повреждения сильно локализованы на площадках контакта, т.е. при малых амплитудах износ прямо пропорционален величине относительного смещения тел, но уже при амплитудах порядка 0,1...0,15 мкм и выше, величина смещения может превышать величину упругих деформаций микровыступов (шероховатости) контакта, и начинают отчетливо проявляться последствия схватывания в зоне фактического касания; дальнейшее увеличение амплитуды относительного смещения тел всё больше приводит к уменьшению эффекта от фреттинг-изнашивания, и взаимодействие сопряженных тел все больше приобретает характер взаимодействия тел при скольжении; так в работе [9] показано, что повреждения типа фреттинг-изнашивания, фреттинг-коррозии могут возникать даже при амплитудах порядка миллиметра и более; если амплитуда колебательного движения большая (около 2,5 мм), то площадь поражения фреттинг-коррозией увеличивается, и изнашивание уже происходит как при однонаправленном скольжении, и поэтому, по мнению авторов [9] можно считать, что амплитуда перемещения поверхностей около 2,5 мм являются верхним пределом амплитуды для возбуждения фреттинг-коррозии;
- второе отличие фреттинг-изнашивания от обычного изнашивания состоит в том, что скорость относительного перемещения контактирующих поверхностей намного ниже традиционных скоростей однонаправленного трения скольжения, так, при амплитуде скольжения 0,025 мм и частоте колебаний 30 Гц максимальная скорость равна 4,7 м/с, в то время как средняя скорость составляет 3 мм/с [10].
- следующее основное отличие заключается в том, что, если при обычном трении скольжения присутствие кислорода может уменьшать износ, то в условиях фреттинг-коррозии кислород усугубляет возникающие повреждения; в этом случае продуктами фреттинг-коррозии металлов являются в основном их окислы, т.е. в присутствии кислорода фреттинг-коррозия сопровождается интенсивными окислительными процессами, и продуктами разрушения являются в основном окислы металлов,

которые в большинстве случаев и являются источниками повреждений, как это в основном имеет место, например, в узлах трения ЖРД, использующих в качестве окислителя жидкий кислород [11].

Фреттинг износ проявляется в повреждениях различных видов и прежде всего в виде объемного износа с геометрическими изменениями, что приводит к нарушению работы деталей или областей их функционирования.

Более детальное рассмотрение некоторых зон фреттинга в ГТД, представленных на рис. 1.6, позволяет последовательно оценить причины, вызывающие повреждения. Так, например, хвостовики лопаток роторов и пазы дисков, хвостовики статорных лопаток и узлы их крепления подвержены сильному фреттинг-изнашиванию из-за деформаций, изгибающих сил, действия высоких статических напряжений, возникающих при действии центробежных сил, изменений температуры и колебаний.

Направляющие лопатки в компрессорах и турбинах обычно крепятся к корпусу съемным образом. Крепежные устройства, такие как фиксирующие защелки или элементы крепления (например, штифты или заклепки), используются для предотвращения их вращения под действием газовых нагрузок. Все контактные поверхности подвержены фреттингу из-за колебаний корпуса и тепловых деформаций. Это может вызвать недопустимое «ослабление поперечного сечения», что, в свою очередь, может привести к поломке или «блужданию» лопастей [7, 11].

Шлицевые соединения, передающие крутящий момент при соединении вала, подвержены разрушительным относительным движениям, вызывающим фреттинг-износ, из-за несоосности, вибрации вала и ошибок изготовления. Воздуховоды, муфтовые соединения с большой площадью поверхности в зоне камеры сгорания, монтажные и направляющие поверхности тонкостенных газопроводов, а также сама камера подвергаются значительным динамическим и тепловым нагрузкам при эксплуатации. Эти факторы в сочетании с окислением могут привести к серьезным, особенно эрозионным повреждениям от изнашивания. Крепление соединений с помощью болтов или фиксаторов, а также направляющих, крепления форсунок и др. также подвержено риску фреттинга.

Демпферы и опорные поверхности в лопастях ротора турбин, элементы которых, в частности, амортизируют вибрирующие лопатки за счет сил трения, возникающих в результате их контакта с корневой поверхностью. Должно быть гарантировано, что это вызванное функциональной необходимостью фреттинг-напряжение можно контролировать на протяжении всего срока службы этих элементов. То же самое касается бандажных полок на больших лопатках

ротора компрессора (обычно в вентиляторе) или кожухах (ободах) ротора турбины, которые часто скреплены друг с другом.

Винтовые соединения, сопрягаемые поверхности, центрирующие кольца, накладные поверхности (детали), отверстия для болтов и т.п. подвергаются действию циклов расширения, вызванные частотой вращения и изменениями температуры (особенно во время запуска/остановки), а также колебания (например, изгиб ротора), которые могут вызвать снижение динамической прочности и сокращение срока службы деталей ротора в сильно нагруженных узлах [7,11].

Известно [12], что агрегаты ЖРД являются мощным источником вибраций, под воздействием которых происходит интенсивное контактное взаимодействие деталей двигателя. Так, в криогенном двигателе VULCAN французской ракеты Ариан 5, по данным [10], присутствует около 350 трибологических пар, 40 различных материалов и более 100 компонентов, и большинство из них работает в условиях фреттинга.

Проведённый в работе трибологический анализ [10], в котором отмечено наличие всех видов износа в контактах трения ЖРД таких, как адгезионный, усталостный, коррозионный и эрозионный износ, особое внимание уделяет фреттингу, называемым иногда неуправляемым, и отказам, особенно связанным с ним в условиях криогенной среды. Основные параметры контактной среды: температура, уровень вибраций, физические свойства жидкости, омывающей контакт, и совместимость с материалами оказывают основное влияние на параметры фреттинга, определяют величину фреттинг-износа. При анализе контактов и оценки их фреттинг-изнашивания основное внимание обращается последовательно, шаг за шагом на такие их параметры как:

- топографическую идентификацию, а именно используемые материалы, наличие покрытий, химические параметры среды;
- описание контактов: контакты Герца, сфера/плоскость, линейный контакт и др.;
- микрогеометрия поверхностей в контакте;
- скорость в контакте может быть: квази-статическая (механическая посадка), низкая скорость 10 м/с (клапаны), средняя скорость <100 м/с (подшипники, шестерни), высокая скорость >100 м/с (случайный контакт между ротором и статором), при этом направление скорости может быть постоянным (подшипник), альтернативным (клапаны, кардан) или неустойчивым или беспорядочным, как при фреттинге.

Характеристики процесса фреттинг-изнашивания определяются условиями эксплуатации конкретных пар трения и в общем случае лежат в диапазоне: частоты – для большинства трибологических пар до 50 Гц, но в ряде случаев могут быть и значительно более высокие уровни

вибраций доходящие до значений 2000 Гц (агрегаты автоматики [12]), при этом диапазоны смещений составляют десятки-сотни мкм, нагрузки же в контактах определяются назначением и конструкцией узла трения, наличием среды горючего или окислителя.

В качестве примера можно рассмотреть многообразие основных контактных пар трения турбонасосного агрегата (ТНА) жидкого водорода, схема которого показана на рис.1.15 [13]. Как следует из обзора этих контактных пар трения, их конструкция и условия эксплуатации определяют не только выбор материалов используемых деталей, но также методы модификации рабочих поверхностей пар трения или материалы покрытий и методы их нанесения.

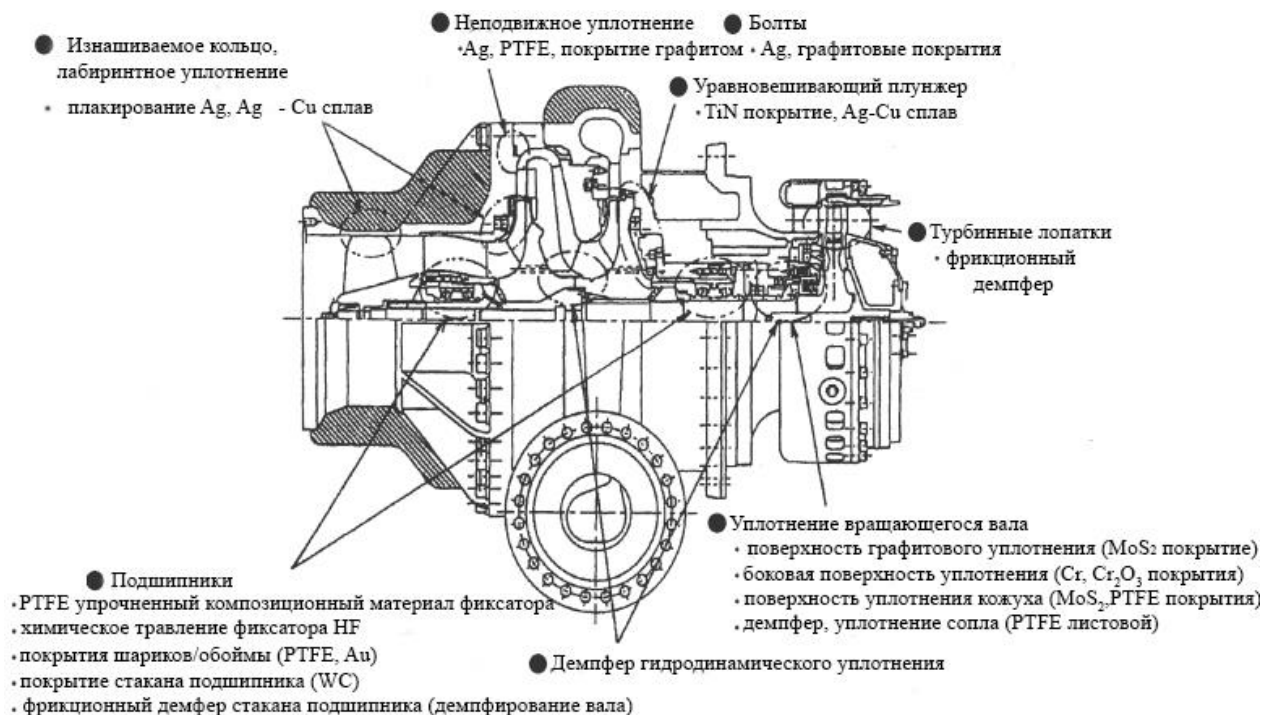


Рис. 1.15. Конструктивная схема турбонасосного агрегата ЖРД [13]

Развивая тему фреттинг-изнашивания в ракетных двигателях следует упомянуть ядерный ракетный двигатель. Типичная конфигурация такого ракетного двигателя показана на рис.1.16 [14]. Очевидно, его отличие от обычного жидкостного ракетного двигателя заключается в замене камеры сгорания жидкостного ракетного двигателя на ядерный реактор, состоящим из активной зоны реактора, которая содержит делящийся материал, обеспечивающий тепловую энергию для нагрева топлива, и связанные с ним элементы управления: управляющий барабан, отражатель и радиационные экраны.

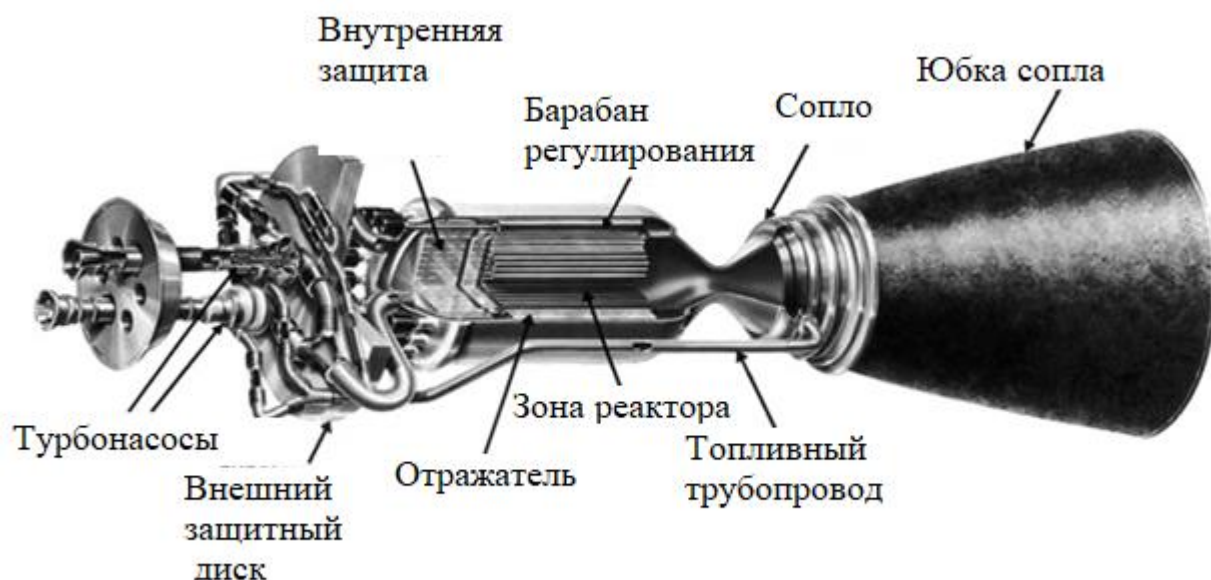


Рис.1.16. Общий вид ядерного ракетного двигателя [14]

Ядерный ракетный двигатель работает так же, как жидкостный ракетный двигатель, в том смысле, что энергия добавляется к топливному газу, когда он проходит над горячей активной зоной реактора, т.е. тепло передается газу. Затем горячий газ разгоняется до высокой скорости в сопле, тем самым создавая тягу. Основным объектом фреттинг-изнашивания – это контакт тепловыделяющих элементов (ТВЭлов) с поверхностями дистанцирующих решеток (ДР), который находится под воздействием газодинамического и теплового возбуждения рабочего тела реактора. Нормальная нагрузка между поверхностью решетки и ТВЭлом определяется предварительным натягом при их сборке и обычно может варьироваться от 3 до 5Н. Для повышения ресурса и надежности ядерных ЭУ (ЯЭУ) большое внимание уделяется исследованию и разработке способов модификации поверхностных слоев ТВЭлов и ДР и формированию покрытий на элементах, входящих в их состав. В основном это связано с необходимостью увеличения коррозионной стойкости и фреттингостойкости тепловыделяющих элементов (ТВЭлов) в связи с увеличением температуры и давления в активной зоне (АЗ) реактора.

Фреттинг-изнашивание, как процесс разрушения контактирующих деталей, в значительной степени определяется свойствами поверхностных слоёв этих деталей. Модификация этих поверхностных слоёв или их "замена" на фреттинг-стойкие слои покрытий, свойства которых могут значительно отличаться от свойств основного материала, позволяет надеяться на повышение стойкости материалов к фреттинг - износу и фреттинг - коррозии. Основные методы защиты от повреждения при фреттинг-коррозии, по данным [1], представлены в схеме на рис. 1.17.



Рис. 1.17. Основные методы защиты от повреждений при фреттинг-коррозии [1]

Уменьшить относительное микросмещение можно путём придания деталям соответствующей конфигурации или посредством повышения силы трения. Так, известно [15], что применение разгружающих выточек в ступицах и двойных конических ступиц взамен цилиндрических повышает предел выносливости валов и осей. Силы трения можно увеличить, повысив давление путём уменьшения площади контакта деталей или повысив коэффициент трения за счёт увеличения шероховатости поверхностей. Давление может быть повышено, но до определённого предела, и так, чтобы проскальзывание поверхностей было снижено значительно до субмикронного уровня или полностью исключено, например, за счёт нанесения на поверхность контакта покрытия (медь, олово, кадмий), увеличивающих жесткость соединения.

Если исключить вибрацию невозможно, то один из путей ослабления повреждений поверхностей от фреттинг-изнашивания является перенос относительного движения в промежуточную среду, используя для этой цели демпфирующие материалы в качестве промежуточных слоёв на основе металлов и их соединений с низким модулем упругости.

Другой путь заключается в использовании различных методов защиты поверхностей от ведущих процессов повреждения (коррозионно-усталостных, предотвращения схватывания, абразивного разрушения) и, в том числе, путем снижения коэффициента трения в контакте. Как показывает анализ схемы на рис.1.17, значительное количество рассматриваемых мер защиты можно реализовать при использовании покрытий, в том числе

и твёрдых смазочных покрытий (ТСП). Фреттинг оказывает большое влияние на усталостную прочность сопряжённых деталей. Установлено [16], что на многих разрушающихся в эксплуатации деталях обнаруживаются усталостные трещины, берущие своё начало в зоне, поражённой фреттингом, и, как правило, проявляющиеся особенно заметно при невысоких циклических перемещениях.

Основной причиной уменьшения усталостной прочности в условиях фреттинга, по данным [16], является адгезия, сопровождающаяся образованием и разрушением металлических связей. Так как при относительном знакопеременном давлении происходит, как правило, упруго – пластическая деформация, то начальное повреждение вследствие фреттинга должно носить усталостный характер, а поверхностные углубления должны образовываться в результате слияния соседних трещин.

Отсюда следует, что использование функциональных покрытий типа ТСП позволяет рассчитывать на снижение фреттинг-износа и фреттинг-коррозии, т.к. в этом случае ТСП, нанесённое, например, на одну из контактирующих поверхностей, примет на себя функцию этой поверхности. Метод защиты поверхностей с помощью ТСП полностью не устраняет фреттинг-износ и фреттинг-коррозию, но значительно снижает их интенсивность.

Таким образом, процесс разрушения контактирующих поверхностей при фреттинге тесно связан с износом, коррозией и усталостью. Некоторые покрытия и методы обработки поверхности эффективны для уменьшения фреттинг-износа, тогда как другие более эффективны в условиях фреттинг-коррозии и фреттинг-усталости.

1.2. Смазка при фреттинге и твёрдые смазочные покрытия

Из анализа основных методов защиты от повреждений при фреттинг-коррозии (рис.1.9) следует, что при наличии вибраций (или относительного скольжения), сопутствующих работе различных изделий, машин и механизмов, исключить которые невозможно, большинство предложений по этой защите сводится в итоге к двум: повышение прочности поверхности за счёт замены материала детали (или обработкой её поверхности) и снижение коэффициента трения.

Смазка является одним из важных методов предотвращения фреттинг-изнашивания, фреттинг-повреждений, прежде всего, благодаря заметному снижению коэффициента трения. Исследовано влияние многих смазочных материалов на фреттинг-характеристики, и были обнаружены некоторые общие черты, хотя большинство экспериментальных данных было получено при совершенно разных условиях [17].

Смазочные материалы сгруппированы в соответствии с их физическим состоянием существования в трех различных формах, то есть жидкие, полутвердые и твердые. Смазочные

материалы жидкие и полутвёрдые (консистентные) широко используются в трибологических системах, таких как контакты качения и скольжения, однако их обычно очень трудно применять в фреттинг-контактах и прежде всего из-за их низкой прочности и высокой чувствительности к контактному давлению.

Новые области применения смазочных материалов в тяжёлых условиях эксплуатации постоянно совершенствующихся конструкций ДЛА и ЭУ требуют, чтобы эти материалы отвечали следующим основным условиям: небольшая прочность на сдвиг, более высокая прочность на сжатие и улучшенная адгезия.

Поэтому основным выбором для использования в таких условиях является твердая смазка, твёрдые смазочные покрытия, так как они могут обеспечить выполнение этих основных условий. С развитием анализа трения и смазки развивались и представления о твёрдой смазке особенно для использования в тяжёлых условиях эксплуатации: при повышенных температурах, при экстремальном контактном давлении, при экстремально низких температурах, в условиях вакуума и радиации. В этих условиях твердые смазочные материалы, возможно, становились единственным доступным вариантом для защиты от повреждений при трении и фреттинге. В Таблице 2 показано сравнение между жидкими и твердыми смазочными материалами [18].

Таблица 2. Сравнительные характеристики твердых и жидких смазок [18]

Переменные характеристики	Жидкие/полутвёрдые смазки	Твёрдые смазки
1	2	3
Температура	-склонность к туману при низких температурах -может испаряться при высоких температурах	-возможность работы в более высоких диапазонах температур (от 200 до 1000 ⁰ С)
Давление	-не работают должным образом в условиях повышенного давления -добавки могут привести к улучшению	-способны выдерживать как более высокие, так и более низкие давления без каких-либо внешних добавок
Трибологический анализ	Коэффициент трения зависит от: - вязкости -температурного градиента - других переменных	-меньшие значения коэффициента трения при более медленных рабочих скоростях -более низкие скорости износа
Тепловая и электропроводимость	-пониженная электропроводность -превосходные тепловые свойства -хорошая теплопроводность	-превосходная электропроводность -превосходная теплопроводность
Тепловыделение	-Зависит от вязкости и температуры	-меньше тепловыделения
Тяжёлые нагрузки	-жидкие и полутвёрдые смазки разжижаются при тяжелых нагрузках -добавки используются для улучшения несущих свойств	- пластинчатые твердые тела используются при экстремальном давлении (тяжёлая механическая обработка, волочение)
Простота хранения	-могут пролиться с вероятностью утечки из резервуара, могут испаряться, разлагаться при транспортировке	-легко хранить, нет риска проливания -могут храниться в течение длительного времени из-за твердого состояния

1	2	3
Скорость скольжения	-на низких скоростях большая нагрузка приводит к сварке неровностей и ухудшению качества поверхности, долговечности и эффективности смазочных материалов	-при низких скоростях неровности, как правило, врезаются в сопряженные поверхности и происходит изнашивание - обеспечивают длительную работу при низких скоростях
Коэффициент трения	-гидродинамические пленки обычно обеспечивают коэффициент трения 0,001–0,003	-низкий коэффициент трения (0,04–0,25)
Приложения и использование	-возможны применения при повышенной скорости, но более низким значением нагрузки -использование базового масла с присадками.	использование в виде мелкодисперсных частиц в: -металлических контактах трения; -антифрикционных контактах трения; -тяжелонагруженных парах трения; -в космосе, в ДЛА и ЭУ

К настоящему времени достигнуты большие успехи в разработке рецептур твердых смазочных покрытий (ТСП), очевиден заметный прогресс при их проектировании, разработке и использовании для широкого спектра промышленных применений.

Актуальное направление в современной трибологии заключается в ограничении или сокращении использования жидких смазочных материалов насколько это возможно (в основном из-за экологических проблем), и в увеличении использования твердых материалов и покрытий с самосмазывающимися свойствами. Компромиссом может быть одновременное сочетание твердых и жидких смазочных материалов с целью удовлетворения требований к выбросам или экологических требований, обеспечивая при этом требуемый уровень характеристик трения и изнашивания.

В настоящее время нет единого покрытия, которое может обеспечить как низкое трение, так и высокую износостойкость в широких диапазонах условий использования, температуры и окружающей среды. Кроме того, твердые смазочные покрытия имеют проблемы с ограниченным сроком службы, со сложностью пополнения, с проблемами окисления и деградации, связанной со старением, с проблемами отвода тепла. На решение этих проблем направлено всё увеличивающееся число исследований.

Всесторонний обзор твердых смазочных материалов и покрытий можно найти в работах [19-21]. В соответствии с рекомендациями [22], в настоящей работе твердые смазочные покрытия разделены на две большие категории: мягкие (твердость <10 ГПа) и твердые (твердость > 10 ГПа) смазки (Таблица 3).

Таблица 3. Классификация трибологических покрытий [22]

Твердые покрытия Твердость > 10 ГПа	Мягкие покрытия Твердость <10 ГПа
Нитриды TiN, CrN, ZrN, BN, BaSO ₄	Мягкие металлы Ag, Pb, Au, In, Sn, Cr, Ni, Cu
Карбиды TiC, WC, CrC	Пластинчатые твердые тела MoS ₂ , WS ₂ , графит, H ₃ BO ₃ ,
Оксиды Al ₂ O ₃ , Cr ₂ O ₃ , TiO ₂ , ZnO, CdO, Cs ₂ O, PbO, Re ₂ O ₇	Галогениды сульфаты, сера CaF ₂ , BaF ₂ , PbS, CaSO ₄ , BaSO
Бориды TiB ₂	Полимеры ПТФЭ, ПЭ, полиимид, полимерный DLC
DLC и Алмаз a-C, ta-C, a-C:H, ta-C:H, CN _x a-C: X (: H), (nc-) алмаз, где DLC = алмазоподобный углерод; a = аморфный; ta = тетраэдрический аморфный; X = металл, nc=нанокристаллический; ПТФЭ = политетрафторэтилен; ПЭ = полиэтилен	

Возможности трибологических твёрдых смазочных покрытий последовательно рассматриваются в работах [22, 23].

Так, твердые покрытия обладают более высокой износостойкостью по сравнению с мягкими, которые могут обеспечить низкое трение, но не всегда высокое сопротивление износу. В качестве износостойких ТСП могут быть использованы нитриды, карбиды, бориды, покрытия на основе углерода (такие как алмаз и DLC) и целый ряд оксидов, используемых как при низких, так и при высоких температурах.

Исторически одними из первых наибольшее коммерческое применение получили однослойные трибологические покрытия, представляющие группу первого поколения и содержащие одну или две фазы, и среди них нитриды и карбиды переходных металлов. Они представляют большой интерес из-за их превосходных свойств, включая твердость, износостойкость, химическую стабильность, высокие температуры плавления и др. Наиболее популярным покрытием считается нитрид титана TiN, кубическая алмазоподобная структура которого обеспечивает ему высокую твердость, низкий коэффициент трения и оптимальную химическую стойкость. Благодаря таким качествам, TiN активно используется для упрочнения режущих инструментов, подшипников и штампов, предотвращая налипание обрабатываемого материала на инструмент. Карбид титана TiC также снижает трение и предотвращает взаимную диффузию и истирание базового материала, увеличивает срок его службы более чем на несколько сотен процентов.

В последние годы значительное внимание уделяется ТСП на основе углерода – DLC (Diamond Like Carbon). Эти пленки изготовлены из sp^2 и sp^3 гибридизированных атомов углерода и могут содержать некоторое количество водорода H (от 1 до 50%), присутствие которого влияет на структуру и свойства покрытия. Алмазоподобные (sp^3) и графитоподобные (sp^2) связи, объединенные в аморфную структуру, сообщают полученному покрытию твердость алмаза и

скольжение графита. Фазовая диаграмма, состоящая из трех компонентов sp^2 , sp^3 и H, показана на рис. 1.18. Помимо фазовой диаграммы, состоящей из трех компонентов sp^2 , sp^3 и H, на рис.1.10 также показаны методы получения различных форм алмазоподобного покрытия [24].



Рис. 1.18. Фазовая диаграмма формирования покрытий на базе DLC [24]

DLC покрытия обычно синтезируют методами физического и химического осаждения в вакууме с использованием различных углеводородных газов или твердых углеродных материалов, при этом самой твердой, гладкой и чистой формой считаются покрытия $ta-C$, т.к. они состоят преимущественно из sp^3 связанных атомов углерода. Эта форма эффективно противостоит абразивному и адгезионному износу.

Категория мягких ТСП включают мягкие металлы, полимеры, галогениды и сульфаты, щелочноземельные металлы и хорошо известные пластинчатые твердые тела, включая дихалькогениды переходных металлов, графиты, борную кислоту. Большинство из них являются самосмазывающимися материалами и в последние годы активно изучаются.

Мягкие металлические смазки отличаются, как известно, тем что их прочность на срез гораздо меньше, чем у материалов трущейся пары, и они не упрочняются, т.е. не увеличивают свои прочность и твердость в процессе пластической деформации в скользящих контактах. По сравнению со слоистыми твердыми смазками они имеют большие коэффициенты трения от 0,1 до 0,4, которые зависят от типа металла и условий испытаний. Мягкие металлы чаще используются в узлах трения при экстремальных условиях эксплуатации – в вакууме, в агрессивных средах, при больших перепадах температур, в криогенной среде и т.п., а также часто используются для защиты деталей крепежных соединений, поскольку они облегчают сборку и защищают от коррозии.

Из пластинчатых твердых тел наиболее популярными покрытиями являются однослойные дихалькогениды переходных металлов MoS_2 , WS_2 (в том числе, с легирующими элементами Ti, Ni, Au, Pb и Sb). Эти покрытия MoS_2 и WS_2 , как и другие пластинчатые твердые материалы, такие

как графит, гексагональный нитрид бора и др., обеспечивают смазку благодаря своей слоистой кристаллической структуре. При этом следует отметить, что тип и температура окружающей среды оказывают значительное влияние на их смазывающую способность. Например, водяной пар необходим для снижения трения графита, но быстро подавляет смазочные свойства MoS_2 , характеристики трения которого значительно разнятся в зависимости от окружающей среды [23].

В большом объеме и в различных приложениях в качестве твёрдых смазок используются полимерные материалы, такие как политетрафторэтилен (PTFE, фторопласт, тефлон), полиэтилен, нейлон, сверхвысокомолекулярный полиэтилен (UHMWPE) и др. Так, низкое трение фторопласта объясняется переносом на сопряженную поверхность очень тонкой пленки, которая благодаря своей слоистой структуре обеспечивает положительный градиент при скольжении. Очень низкий коэффициент трения от 0,02 до 0,05 обеспечивается трением перенесённой пленки фторопласта и основного материала фторопласта друг относительно друга, малой адгезией при трении и небольшим сопротивлением сдвигу. Часто используется фторопласт как антифрикционная добавка к различным композиционным материалам.

Многослойные и многокомпонентные покрытия представляют собой трибологические покрытия второго поколения, которые, согласно [25], чаще всего формируются с использованием вакуумного осаждения. В этом случае основание (подложка) обеспечивает поддержку нагрузки для покрытия, которое, в свою очередь, допускает любые деформации поверхности без образования трещин или отслоения.

В качестве износостойких твердосмазочных покрытий второго поколения широко применяются соединения тугоплавких металлов IV–VI групп Периодической системы элементов с кислородом, углеродом и азотом. Бинарные твердые материалы, и прежде всего TiN и TiC, сформировали первые успешные твердые покрытия, свойства которых хорошо варьировались благодаря широкой области их гомогенности, что позволило, в зависимости от содержания кислорода, углерода и азота сильно изменять физико-химические свойства покрытий. Этому также способствовали выбор процесса осаждения и его режимных параметров [26]. Помимо хороших собственных физических и химических свойств этих бинарных материалов было обнаружено улучшение этих свойств при их сплавлении с металлическими и металлоидными компонентами. В таблице 4 представлена простая классификация (по химическому составу) таких покрытий и их типичные примеры [27].

Таблица 4. Классификация трибологических износостойких покрытий [27].

Одноэлементные	На основе соединения одного тугоплавкого металла TiN, TiC
Многоэлементные	На основе соединения двух или более тугоплавких металлов – (Ti-Cr)N
Многокомпонентные	На основе смесей двух или более соединений одного металла – TiCN
Композиционные	На основе смесей двух или более соединений двух или более металлов –TiCr– Al ₂ O ₃ –TiN

Так, среди наиболее характерных примеров многоэлементного покрытия этого поколения можно назвать TiAlN, разработка которого привела к появлению многообещающих свойств и к увеличению срока службы, в частности, режущего инструмента, работающего при сухом трении, при этом содержание алюминия значительно влияет на его механические и трибохимические свойства. Наиболее эффективны эти покрытия при механической обработке материалов с низким уровнем теплопроводности – никелевые сплавы, нержавеющие стали, титановые сплавы. TiAlN оптимально подходит для сухой высокоскоростной обработки, обработки закаленных сталей.

Карбонитрид титана TiCN- тугоплавкое многокомпонентное покрытие обладает высокими физико-механическими свойствами и имеет низкий коэффициент трения, благодаря чему обработанные инструменты могут полноценно работать в режиме фрезерования, ударном режиме, при нарезании резьбы. Получают его практически так же, как и нитрид титана, только в качестве реакционного газа используется смесь азота с ацетиленом или пропаном, а не чистый азот.

Многослойные наноструктурные покрытия сложного состава на основе BN, TiC, TiN, TiAlN обладают сверхвысокой (до 70 ГПа) твердостью и хорошо зарекомендовали себя при трении скольжения. Так, например, в изготовлении режущего инструмента хорошо зарекомендовали себя многослойно–композиционные покрытия с переменными свойствами и химическим составом, они хорошо сопротивляются хрупкому разрушению в условиях развития трещин и при сильных пластических деформациях. Композиционные покрытия, в состав которых входят такие соединения, как оксиды (Al₂O₃), бориды (HfB₂, NbB₂, TaB₂) и Si₃N₄, используются в качестве барьерных слоев, сдерживая диффузионные процессы, являются также термоизолирующими слоями, защищают инструментальный материал от коррозии и окисления при высоких температурах [27].

Таким образом, благодаря использования методов вакуумного осаждения и их универсальности получают износостойкие твердые трибологические покрытия в виде карбидов, нитридов и боридов переходных металлов, отмечено также, что включение ванадия в такие системы покрытий, благодаря образуемому оксиду ванадия, позволяет получить достаточно низкие коэффициенты трения и величины износа при повышенных температурах. Помимо комбинаций с участием бинарных компонентов развитие получили «четвертичные» и

высшие компоненты типа (Ti, Al, V) C, N и (Ti, Al, Cr) N. Так, для улучшения трибологических свойств покрытия TiAlN при температуре выше 500 °С в его состав был включен ванадий V, что дало возможность образовывать смазочные фазы на основе легко поддающихся сдвигу оксидов (часто называемых фазами Магнели, а именно V_nO_{3n-1}). Как показано в работе [28], введение ванадия V увеличило твердость покрытия с 35 до 46 ГПа за счет упрочнения твердого раствора, а трибологические испытания (сфера–диск) при увеличении температуры до 700°С привело к снижению коэффициента трения с 0,8 до 0,43.

Таким образом, комбинирование в одном покрытии нескольких слоев разных структур и составов позволяет получить такие индивидуальные физические свойства покрытий, как совмещение диффузионного барьера с получением более низкого трения, уменьшение несоответствия механических и химических свойств подложки и покрытия (в основном для повышения адгезии), контроль остаточной деформации и напряжений в покрытиях, предотвращение образования трещин в покрытиях в тяжелых условиях эксплуатации, повышение твердости и/или ударной вязкости, позволяя слоям или фазам скользить друг относительно друга при снижении трения и повышении износостойкости [130].

Новое, интенсивно развивающееся направление развития и управления структурой и составом покрытий связано с наномасштабом исследований и приложений ТСП. В этом поколении покрытий рассматриваются три основных подхода к управлению их структурой и составом [28].

Один из первых подходов – это формирование функционально градиентных покрытий, представляющих собой логическое продолжение многослойных покрытий. Поскольку идеальная твердая смазка должна иметь низкий коэффициент трения, в сочетании с высокой износостойкостью, то можно включать кластеры смазочного материала в матрицу твердого износостойкого покрытия. Такое композитное покрытие может обеспечить как износостойкость, так и твердую смазку с новыми карманами со смазкой, открывающимися по мере износа покрытия. В общем случае реализация градиентных покрытий может осуществлена различными способами: от изменения в процессе осаждения соотношения реактивных газов, например, как в случае формирования градиентного покрытия CrCN при изменении соотношения C_2H_2 и состава смеси Ar+N₂ при магнетронном осаждении [29], до получения таких покрытий простым изменением разрядного тока, дистанции осаждения, напряжения смещения и т. д.

Наноструктурные покрытия – это покрытия, материал которых отличается микроструктурой, характерный масштаб которой составляет 1–100 нанометров. Свойства наноматериалов отличаются от свойств монокристаллов (или крупнозернистых поликристаллов) с таким же средним химическим составом, и это является результатом уменьшенного размера

и/или размерности кристаллитов нанометрового размера, а также наличием многочисленных границ раздела между соседними кристаллитами.

Другим наиболее распространенным способом изменения микроструктуры и физико-химических свойств покрытий является реализация процесса осаждения в условиях бомбардировки растущей поверхности энергетическими ионами. Так в работе [30] отмечается, что энергия E , передаваемая пленке во время ее роста за счет бомбардировки ионами E_i и конденсирующимися атомами является ключевым параметром, который определяет механизм её роста, её элементный и фазовый состав, микроструктуру и, следовательно, её окончательные физические свойства. Утверждается также, что параметры пленок следует рассматривать как функцию этой энергии E_i , а не только как функцию параметров процесса осаждения. С использованием ионно-плазменных технологий достигается: осаждением однослойных и нанослойных покрытий при бомбардировке конденсата ионами с энергией более 100 эВ, введением легирующих добавок, ограничивающих рост зерна и формированием многофазных композитов.

И наконец, еще одним способом получения нанопокровтий этого поколения ТСП является осаждение многослойных покрытий со слоями нанометрической толщины или сверхрешеток. Основной смысл создания таких многослойных композиций заключается в том, что композиции с чередующимися слоями металлов и соединений обладают различными внутренними напряжениями (модулями упругости) и близкими по величине коэффициентами термического расширения. Толщина отдельных слоев, отвечающая концепции многослойности, лежит в диапазоне 5–50 нм и должна исключать появление внутри слоя источника дислокаций. Использование наноламинированных (нанослоистых) структур значительно повышает твердость, прочность и адгезию покрытий, и тем самым улучшает трение и износостойкость полученных покрытий. Многослойные покрытия по данным [31] отвечают многим требованиям, таким как многофункциональность, умеренные остаточные напряжения, хорошая адгезия к металлическим подложкам, надлежащее соотношение твердости и вязкости и низкие коэффициенты трения. Все эти свойства удовлетворяют требованиям износостойкости. Показано также, что при формировании многослойных покрытий используемые материалы подбираются в зависимости от характера химической связи: металлической, ковалентной или ионной (рис. 1.19) [31]. Такой подход вносит значительный вклад в понимание свойств кристаллических структур отдельных слоев и их поведение в различных условиях эксплуатации.

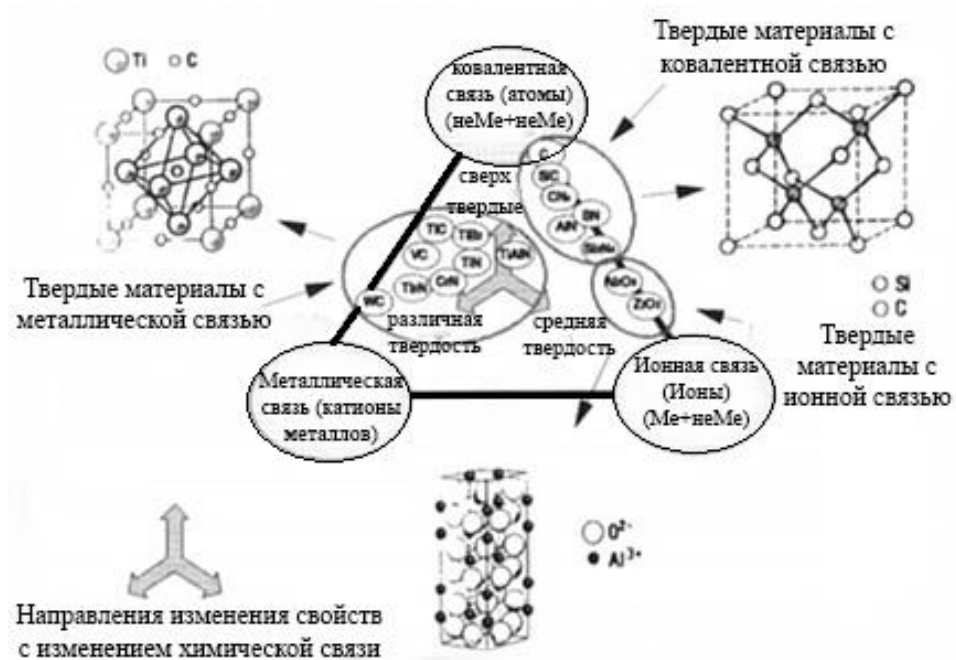


Рис. 1.19. Различные группы твёрдых материалов с кристаллической структурой [31]

И наконец, последнее поколение включает покрытия, которые изменяют свойства поверхности (как химический состав, так и структуру) самостоятельно, адаптируясь к изменяющимся условиям трибологического контакта (покрытия типа «хамелеон»). Такие покрытия наиболее полно удовлетворяют требованиям к узлам трения космических аппаратов, которые работают в сильно меняющихся условиях окружающей среды: атомарного кислорода, солнечного излучения, энергичных частиц и циклического изменения температуры от криогенной до + 400 °С. Кроме того, эти системы покрытий, испытанные на Земле, много лет хранятся в контролируемых условиях перед запуском, а во время возвращения на Землю могут нагреваться и до 800 °С.

Обладают эти покрытия композиционной структурой, которая объединяет несколько твердых смазочных материалов, включенных в матрицу покрытия, и поэтому при изменении условий эксплуатации на поверхности покрытия меняется состав, адаптируясь к новым условиям трения.

Одно из первых покрытий типа «хамелеон», было выполнено в системе W–C–S, которая состояла из зерен WC размером 1–2 нм и WS₂ размером 5–10 нм, внедренных в аморфную матрицу DLC [32]. Наноккомпозит WC/DLC/WS₂ продемонстрировал самоадаптацию к трибологическим условиям аэрокосмических систем. Эта самоадаптация была установлена сначала при кристаллизации, а затем при переориентации нанокристаллического зерна WS₂, графитизации первоначально аморфной DLC матрицы и обратимого регулирования состава пленки при взаимодействии между WS₂ и графитом при

чередовании сухого воздуха и влажного. Был отмечен сенергетический эффект DLC/WS₂, обеспечивший снижение трения в окислительной среде. Коэффициент трения 0,05 был получен, как во время космического моделирования, так и при имитационных лабораторных испытаниях в вакууме [32].

Опубликованные данные по большинству твердых смазочных покрытий часто основаны на работах, выполняемых в небольших масштабах на лабораторных установках. Формирование таких покрытий на промышленных деталях и компонентах со сложными формами и большими размерами и в больших объемах производства, сталкивается с рядом трудностей, что особенно актуально для промышленного использования покрытий экзотической архитектуры, включающие градиентную, сверхрешетчатую и нано структурированную.

Таким образом, можно утверждать, что универсальных покрытий не существует, каждое из рассмотренных поколений покрытий довольно уникально и разработано для определенных (заданных) условий применения. Поэтому поиск новых твердых смазочных покрытий и совершенствование методов их нанесения продолжается, особенно для защиты от износа в сухих или почти сухих условиях трения.

1.3. Обзор методов формирования ТСП и обоснование выбора плазменных методов

В инженерии поверхности принято рассматривать следующие типы поверхностных слоёв (ПС) [11]:

- модифицированный ПС – с изменёнными свойствами (составом) без изменения размера базовой поверхности (подложки);
- ПС с покрытием – с покрытием или плёнкой на поверхности, имеющие границу раздела с подложкой и размер;
- диффузионно-покровный ПС – слой, со смешанной структурой: модифицированный слой плюс покрытие.

Поверхностный слой играет определяющую роль в формировании эксплуатационных свойств деталей. Формирование его на поверхности детали изменяет физико-химические свойства поверхности в требуемом направлении: или изменяет свойства исходных поверхностей деталей, получаемые в процессе производства, или позволяет восстановить утраченные в процессе эксплуатации свойства. Наиболее эффективно этого можно добиться при использовании покрытий, свойства материала которых могут существенно отличаться от свойств исходной поверхности, а полученные при этом новые физические свойства, химический и

фазовый состав поверхности позволяют получить детали с требуемыми эксплуатационными характеристиками ПС, в том числе и твёрдосмазочными характеристиками.

За последние годы разрабатывается и применяется всё большее число новых вариантов узлов трения, использующих ТСП, предлагаются новые составы покрытий и пленок и способы их нанесения. Однако требования, предъявляемые к деталям узлов трения, и особенно ДЛА и ЭУ, а также к технологии их изготовления, постоянно ужесточаются с учетом новых технических, экономических и экологических факторов. В связи с этим задачи создания принципиально новых технологий формирования ТСП, разработки их составов и совершенствования методов их нанесения (осаждения) представляются чрезвычайно важными.

Особенно большой интерес проявлен к плазменным и вакуумно-плазменным методам формирования ТСП, что объясняется их широкими технологическими возможностями, позволяющими: формировать в едином технологическом цикле практически любые композиции и конструкции покрытий, обеспечивая при этом предварительную подготовку поверхностного слоя детали, проводить плазмохимические процессы синтеза новых соединений ТСП, формировать покрытия диффузионно-покровного типа, состав которых является продуктом взаимодействия компонентов насыщающей среды с материалом поверхностного слоя, используя комбинацию различных плазменных и вакуумно-плазменных методов, получать ТСП с любыми служебными свойствами, недостижимыми никакими другими методами.

Поскольку единой системы классификации методов нанесения покрытий нет, и в литературных обзорах и статьях встречаются различные принципы классификации, наиболее удачной можно считать классификацию, построенную на выделении методов, основанных на фазовом состоянии материала, из которого формируются ТСП: из твёрдого, из газообразного состояния, из растворов и из расплавленного и полу-расплавленного состояния. Поскольку акцент в настоящей работе сделан в основном на применении для получения ТСП плазменных и вакуумно-плазменных методов, то методы формирования покрытий из твёрдого состояния не рассматриваются. На рис.1.20 представлена схема [20], в которой представлены основные методы получения ТСП, используемые как в лабораторных, так и в промышленных масштабах.

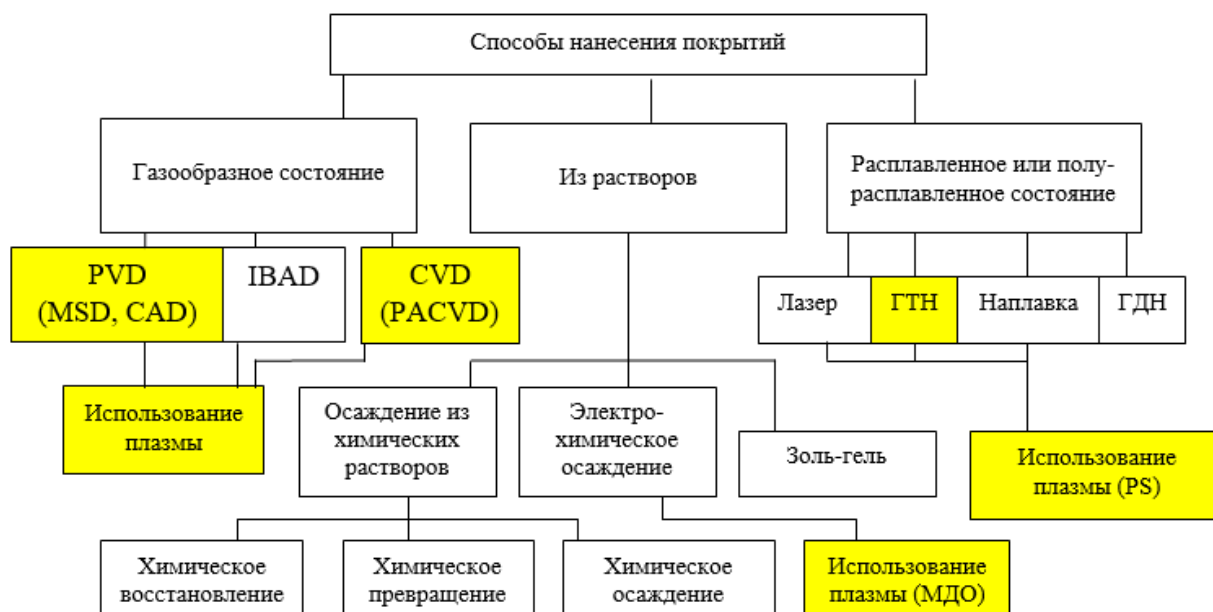
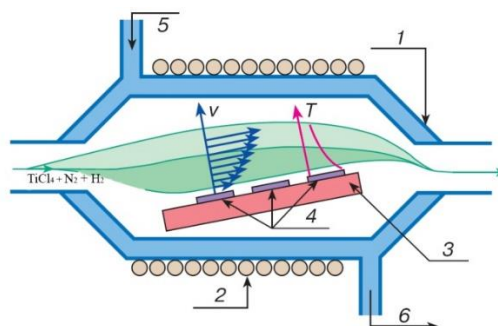


Рис.1.20. Методы осаждения ТСП, основанные на фазовом состоянии осаждаемого материала (выделенные методы используются в настоящей работе) [20]

Метод химического осаждения из паровой фазы (chemical vapor deposition - CVD) заключается в нанесении твердого слоя на нагретую поверхность в результате химической реакции из паровой или газовой фазы [34], как показано на рисунке 1.21.



1-кварцевый корпус; 2-катушка ВЧ генератора; 3-блок нагревания;
4-подложки; 5,6-водяное охлаждение

Рис.1.21. Схема процесса CVD [34]

Это универсальный процесс, который можно использовать для нанесения слоев металлов, неметаллических элементов (например, такие как углерод и кремний), соединений (такие как нитриды, карбиды и оксиды), интерметаллидов, а также многие других материалов. В зависимости от рабочего давления и окружающей среды CVD можно классифицировать как CVD при атмосферном давлении (atmospheric pressure - APCVD), CVD низкого давления (low pressure - LPCVD) и CVD с плазменным сопровождением (plasma assisted - PACVD). Этот процесс может создавать покрытия с однородной толщиной и низкой пористостью даже на подложках сложной

формы. Его основным недостатком является высокая температура подложки (кроме PACVD), которая вызывает искажение подложек и ограничивает области применения, в которых материалы подложек имеют низкое термическое сопротивление.

Физическое осаждение из паровой фазы – (physical vapour deposition - PVD) - это процесс атомного осаждения, при котором материал испаряется из твердого источника в форме атомов или молекул, транспортируемых в форме пара в вакууме или газовой (или плазменной) среде низкого давления к подложке, где он конденсируется с образованием покрытия. Обычно процессы PVD используются для нанесения пленок толщиной от нескольких нанометров до нескольких микрон. Основные разновидности методов PVD (способов перевода исходных материалов из твёрдого источника в атомарное состояние) представлены схематично на рис. 1.22 [20].

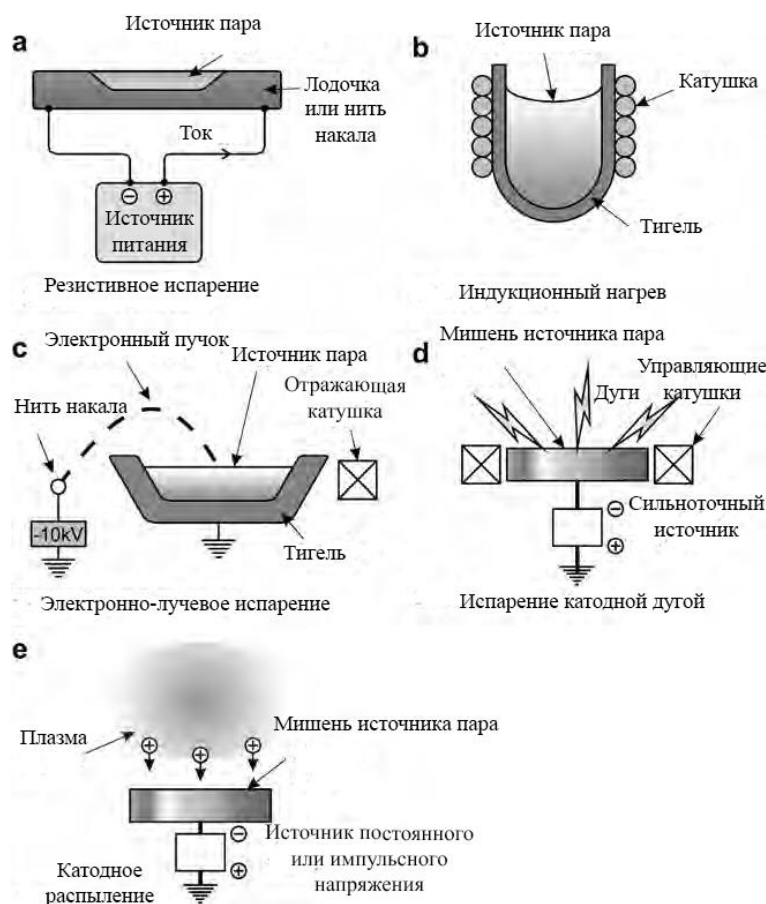


Рис. 1.22. Способы перевода исходных материалов в атомарное состояние в методах PVD [20]

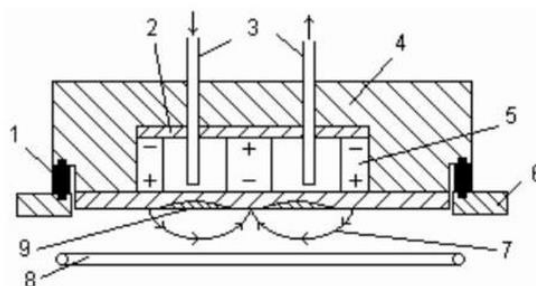
Материалы, формирующие покрытия, могут удаляться из источника либо путем ввода тепловой энергии, либо путем передачи кинетической энергии, поэтому методы PVD часто делятся на испарительные и распылительные. Испарение заключается в термическом испарении из источника материала осаждения: способом прямого пропускания тока, или резистивным (рис. 1.22, а), индукционным нагревом (рис. 1.22 б), с помощью электроннолучевого испарения (рис.

1.22 с) и катодного дугового испарения (рис. 1.22 d). Распыление - это кинетический контролируемый процесс, в котором исходный материал или мишень, находясь под потенциалом катода бомбардируются ионами, обычно инертного газа (рис. 1.22 е). Это сопровождается передачей импульса ионов атомам в мишени, что приводит к выбросу атомов мишени и осаждению покрытия.

В последнее время был разработан ряд новых методов PVD, которые представляют собой гибриды теплового и кинетического методов. Хотя метод PVD изначально использовался как средство нанесения металлических покрытий, он все чаще используется для осаждения сплавов и керамики. В последнем случае это достигается либо с помощью керамического источника, либо с использованием источника из металла в сочетании с химически активным газом, таким как кислород, азот или метан для получения, например, оксидов, нитридов или карбидов.

Если эти процессы PVD сопровождаются действием плазмы тлеющего или дугового разрядов, то они обычно называются методами физического осаждения с плазменным сопровождением (plasma assisted - PAPVD), в которых, благодаря использованию контроля зарождения и кинетики роста пленки, обеспечивается формирование покрытий с недостижимыми ранее свойствами. Среди преимуществ процессов PAPVD, как в некоторых случаях и процессов PACVD, согласно [20], можно отметить основные: улучшенную адгезию покрытий за счет способности очищать и предварительно нагревать подложки энергичными ионами и нейтральной бомбардировкой поверхности подложки (очистка распылением); исключение заключительной стадии механической обработки или полировки после нанесения покрытия, поскольку в большинстве случаев покрытия повторяют исходную отделку поверхности; контролируемые структуры покрытия за счет эффекта бомбардировки, способствующего подвижности атомов и предотвращения столбчатого роста, а также использования радиочастотного или импульсного смещения (отрицательного потенциала) на подложке; регулируемые скорости осаждения с использованием широкого спектра источников пара, включая резистивный нагрев, электронно-лучевой, дуговой, индукционный и распылительный магнетрон.

В магнетронном распылении мишени (рис. 1.23) магнитное поле используется для захвата электронов вблизи мишени и для их вращения по спирали вокруг, так называемой «беговой дорожки», тем самым увеличивая степень ионизации рабочего газа и, следовательно, скорость распыления. Наибольший прогресс в исследованиях трибологических покрытий PVD произошел с использованием процесса магнетронного распыления, благодаря снижению необходимого давления и увеличению скорости нанесения покрытий, по сравнению с классическими диодными и триодными схемами [35].



1-изолятор;2-магнитопровод; 3- система водоохлаждения; 4-корпус катодного узла;
 5-постоянный магнит; 6- стенка вакуумной камеры;
 7-силовые линии магнитного поля (“беговая дорожка” электронов);
 8-кольцевой анод; 9-зона эрозии распыляемого катода-мишени

Рис.1.23. Схема планарного цилиндрического магнетрона [35]

Из группы методов получения ТСП из жидкого состояния (растворов) наибольшее распространение получил метод нанесения покрытий из суспензий твердой смазки со связующим и с последующим отверждением их термической обработкой [36]. Наносят суспензии с ТСП окунанием, кистью, пульверизатором и при помощи аэрозолей. Недосток этого типа покрытий состоит в том, что антифрикционные свойства, долговечность и прочность сцепления покрытия с подложкой сильно зависят от свойств связующего вещества (как правило органического) и его термической стабильности.

Химическое и электрохимическое осаждение (electroplating) осуществляются в электролитических ваннах с использованием (или без использования) электрического тока в виде реакций восстановления, преобразования, электролиза и т.п. К этим методам относятся хорошо известные процессы фосфатирования, хромирования, никелирования и т.д. [37], однако выбор металлов, которые можно нанести этими методами для использования их в качестве ТСП, довольно ограничен, этими методами получают в основном антикоррозионные покрытия.

Разновидностью формирования покрытий из растворов является золь-гель процесс, состоящий из приготовления галлоидальной суспензии с размером частиц от 2 нм до 1 мкм, нанесении ее на подложку, высушивания золя в гель и последующего отжига для получения плотного покрытия с хорошей адгезией. Как правило, этот процесс можно использовать для получения ТСП, например, с оксидами кремния, циркония, а также как составных частей композитных трибологических покрытий [33]. Золь - это коллоидная дисперсия частиц в жидкости, обычно водной, но иногда и органической. Обработка золем может быть осуществлена окунанием, окрашиванием, распылением. Это включает нанесение золя на субстрат, после чего он подвергается гидролизу и конденсации с образованием геля. Окончательная сушка приводит

к дальнейшей конденсации и образованию плотной поверхностной пленки. Обычно этот метод используется для производства оксидных керамических пленок, и в этом случае гель обжигается при температуре выше 150 С, чтобы синтезировать керамику.

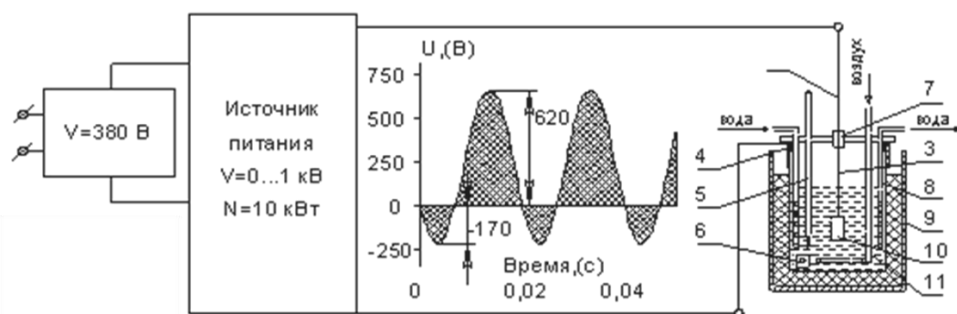
Сведений о трибологических свойствах золь-гелевых пленок по сравнению с пленками, полученными другими методами в литературе явно недостаточно, однако пропитки пористых поверхностей покрытий на основе золь-геля с последующей высокотемпературной постобработкой (отжигом) могут использоваться для повышения стойкости к истиранию металлических или керамических субстратов (подложек). Таким образом, золь-гель методы могут быть полезными для получения композитных ТСП с контролируемыми структурными и эксплуатационными характеристиками.

Давно известен [38], но имеет ограниченное применение электрохимический метод осаждения твердых смазок (в частности, графита) на металлы и сплавы из суспензий под воздействием постоянного электрического тока (метод электрофореза). К сожалению, адгезия этих покрытий к подложке недостаточно высокая, поэтому электрофоретические покрытия больше используются в неподвижных или малоподвижных узлах трения. Электрофорез представляет собой процесс миграции электрически заряженных эмульгированных частиц на противоположно заряженный электрод и осаждение их на электроде под действием электрического тока. В этом методе используются, в основном, следующие классы частиц размером от микрометров до нанометров: оксиды (ZrO_2 , Al_2O_3), нитриды (TiN, TiCN и т.д.), карбиды (WC, SiC, TiC, графит), бориды (TiB_2 , CBN и т. д.) и керметы (WC-Co).

Плазменный электролиз - это группа процессов на основе электролитической плазмы, которые осуществляются в жидком электролите [39]. Эти процессы особенно подходят для изготовления поверхностных слоев из твердой квазикерамики на легких металлах, таких как алюминий, магний и титан и др. и их сплавов, представляющих собой оксиды, включающие другие элементы, входящие в состав сплавов и электролитов, а также взвешенные в электролите микро- и наночастицы и даже органические соединения. Поэтому плазменные электролитические процессы приобретают все большее значение в трибологических приложениях, особенно для деталей из легких металлов, а также в качестве поддерживающего слоя для последующих покрытий или пропитки.

Большое распространение получил метод микродугового оксидирования (МДО), позволяющий получить высокоизносостойкие покрытия на поверхности так называемых «вентильных» металлов, к которым относятся такие металлы, как Al, Mg, Ti, Zr и др. сплавы на их основе, и оксиды которых являются полупроводниками. Процесс микродугового оксидирования металлов «вентильной» группы протекает в электролите при высоких напряжениях ~ 1000 В. Напряженность электрического поля при этом достигает 10^6 В/м и более,

что приводит к пробое первоначально сформировавшейся анодной пленки. Поиски режимов оксидирования при таких напряжениях, позволяющих получить плотные покрытия с высокой адгезией, привели к использованию микродугового анодирования и катодирования в одной технологической операции на одной детали. Такой процесс получил название анодно-катодного микродугового оксидирования (АКМДО). Схема установки МДО представлена на рис. 1.24, из которого следует, что формирование покрытий осуществляется при подаче асимметричного переменного напряжения от источника питания на деталь и корпус электролитической ванны.



1 – шина; 2 - электролит; 3 – подвеска образца; 4 – уплотнения; 5 – градусник; 6 – барботер; 7 – крепление подвески; 8 – изолятор; 9 – корпус ванны; 10 – образец; 11 – ванна.

Рис. 1.24. Схема установки микродугового оксидирования

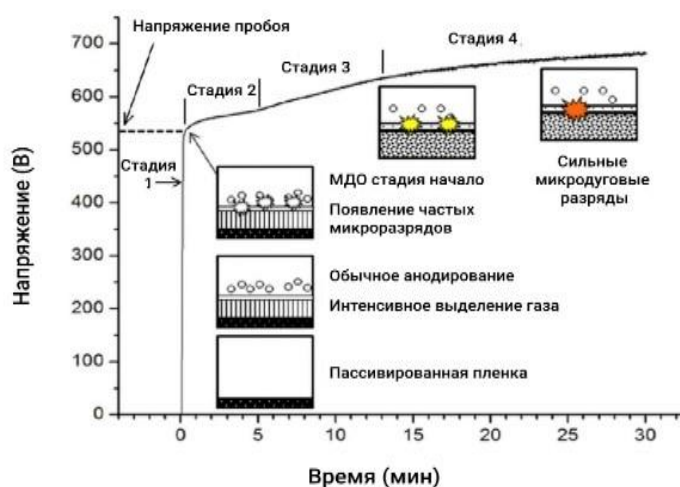


Рис. 1.25. Процесс микродугового оксидирования [39]

Типовая формовочная кривая процесса МДО представлена на рис.1.25. [39]. В начальный период при положительной поляризации обрабатываемой детали начинается процесс анодного растворения металла. При достижении потенциала пассивации, скорость растворения поверхности резко снижается, а дальнейшее увеличение потенциала ведет к возрастанию токов внутри пленки и росту оксидного слоя. Такой рост пленки называется анодированием (стадия 1).

Рост толщины пленки вызывает увеличение её сопротивления, что приводит к уменьшению тока в ней, т.е. падению скорости роста оксида. Для дальнейшего роста покрытия требуется повышение напряжения, что приводит к активации атомов оксидной пленки, за счет больших значений напряженности поля в ней, и образованием свободных электронов, которые начинают свое движение в сторону положительного потенциала. При достижении критических значений напряженности поля, активированные электроны могут вызвать лавинообразную активацию атомов на своем пути, что приводит к возникновению пробоя. Явление пробоя свидетельствует о начале стадии искрения (стадия 2), в которой продолжается рост пленки. Этот период характеризуется образованием на поверхности обрабатываемой детали большого количества быстро перемещающихся мелких искр.

Микроразряды на поверхности вызывают образование нового вещества и утолщение покрытия (стадия 3), что при поддержании постоянного уровня тока через поверхность ведет к уменьшению количества разрядов и увеличению плотности тока в отдельно взятом разряде. На этом этапе повышается значение теплового фактора в формировании покрытия, процесс переходит в стадию микродугового оксидирования (МДО), на которой и формируются качественные функциональные оксидные покрытия. Дальнейшее развитие процесса приводит к разрушению покрытия – процесс переходит в дуговую стадию (стадия 4), недопустимую для получения качественных покрытий.

Многочисленными исследованиями установлено, что по всем основным характеристикам МДО покрытия на алюминиевых сплавах, например, превосходят анодные покрытия. Особенно важным с точки зрения износостойкости покрытий представляется тот факт, что МДО покрытия обладают очень высокой твердостью, что объясняется наличием кристаллической высокотвёрдой структуры $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (корунд). Метод МДО имеет определённые достоинства, как перед традиционным анодированием и другими хорошо освоенными в промышленности методами, и среди них:

- дешевое технологическое оборудование для МДО (электролитическая ванна с недорогим электролитом, источник питания);
- высокая адгезия МДО покрытий, получаемая без дополнительных мер по очистке обрабатываемой поверхности;
- возможность получения износостойких покрытий толщиной порядка нескольких десятков мкм, что играет большую роль в продолжительности работы покрытий трибологического применения.

Эти преимущества характеризуют метод МДО как многообещающий для получения на металлах и сплавах «вентильной» группы, покрытий с характеристиками изнашивания, требуемыми для эксплуатации их в составе изделий ДЛА и ЭУ.

В группу методов формирования ТСП из расплавленного и полурасплавленного состояния входит большое число методов лазерного оплавления и электродуговой наплавки, когда с помощью лазерного излучения [40] или электрической дуги [41] осуществляется поверхностное модифицированное предварительно нанесенных слоев осаждаемого материала: газотермически, электролитически, путем обмазки или использования напыляемых (или подаваемых в зону расплава) порошков, проволоки или фольги. Как правило, этими методами получают толстые покрытия 40-200 мкм. Триботехнические характеристики таких покрытий определяются в основном подбором соответствующих материалов, а физические свойства и адгезия к подложке режимами оплавления и наплавки.

Газотермическое напыление (thermal spraying – TS) – следующая группа методов получения покрытий из расплавленных и полурасплавленных частиц с помощью газовой струи. Место этих методов, которые могут быть использованы при получении ТСП, представлен на рис. 1.26 [42].

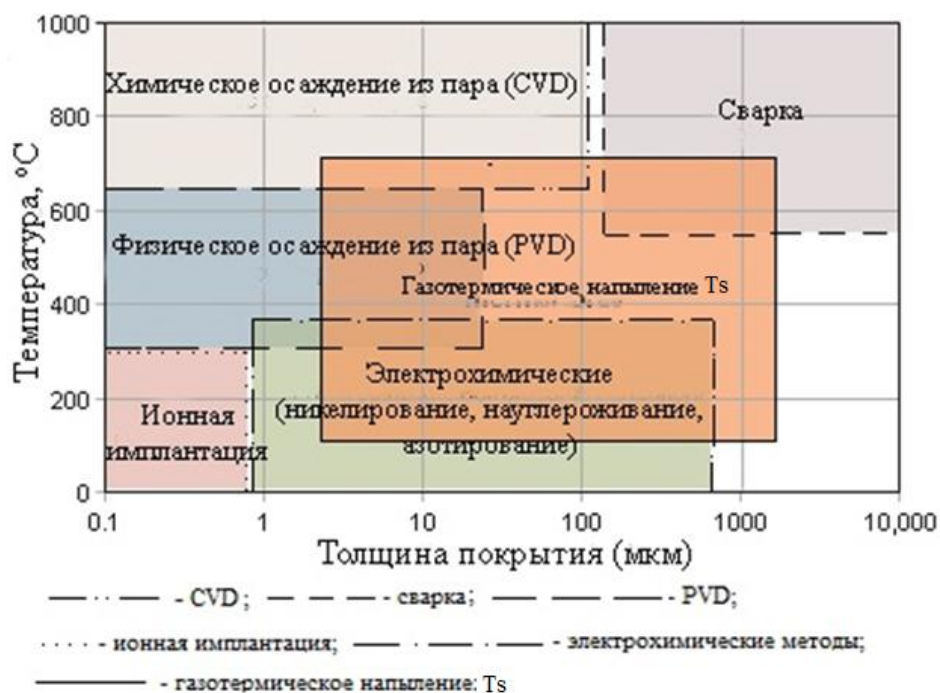


Рис. 1.26. Область газотермических технологий среди современных методов формирования покрытий [42]

Фактически эти методы делятся на две большие подгруппы: газопламенные и плазменные методы. В состав газопламенных методов входят: газопламенное напыление (ГН), детонационное напыление (ДН) и высокоскоростное напыление (ВСН), при этом в зависимости

от используемого метода в качестве расходного материала порошки, стержни, проволоки и шнуры, наполнителями которых являются, как правило, композиционные порошки.

Расплавленные частицы, ускоряемые газовым потоком, соединяются на поверхности деталей посредством сварки, адгезии и механического сцепления, формируя слоистые структуры, и этим слоям при формировании ТСП подбором материалов и использованием различных технологических приемов могут быть приданы требуемые смазывающие свойства.

Наиболее распространены в производстве ДЛА и ЭУ газоплазменные методы. В их состав входят методы, использующие электрическую энергию для формирования газотермических покрытий, а именно: электродуговая металлизация (ЭДМ), плазменное напыление (ПН) и газодинамическое напыление (ГДН).

При электродуговой металлизации (ЭДМ) между двумя электропроводящими проволоками (одинаковыми или разными по составу) зажигается дуговой разряд, а струя сжатого воздуха распыляет частицы расплавленного металла и переносит их на обрабатываемую поверхность. Этот процесс напыления отличается высокой производительностью до 20 кг/час, скорость напыляемых частиц – до 150 м/с, температура в дуге до 4000⁰С, эффективный КПД составляет 0,7-0,9, и этот процесс является самым высокопроизводительным среди всех методов газотермического напыления.

При плазменном напылении (plasma spraying - PS) порошок подаётся в плазматрон, как правило снаружи, под срез сопла (рис. 1.27) [43], плавится плазменной струёй и ускоряется в направлении покрываемой поверхности детали.

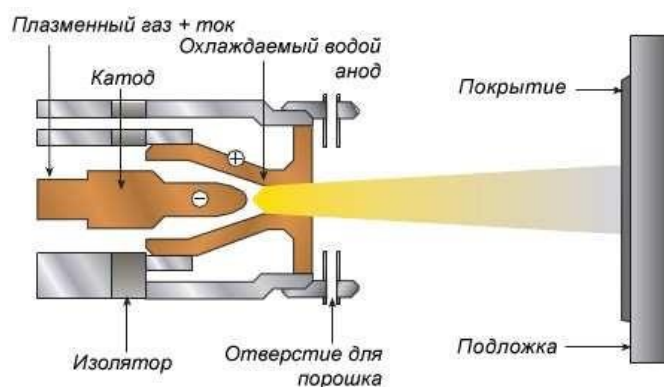


Рис. 1.27. Принципиальная схема плазматрона [43]

Плазма генерируется электрической дугой между центральным катодом и охлаждаемым водой анодом, горячей в аргоне, гелии, азоте, водороде или их смеси. Этот процесс используется при нормальной атмосфере (atmospheric PS - APS), в защитном газе аргоне (inert PS - IPS), в вакууме (vacuum PS - VPS), в разреженной атмосфере (low pressure PS - LPPS) и под водой (under water PS - UPS). На рис.1.28 показан наиболее распространённый на практике плазматрон F4-MB фирмы Sulzer Metco со следующими характеристиками: мощность – 25-40 кВт (I=200-500А;

$U=15-80\text{В}$), расход газа – 30-40 л/мин, расход порошка – 3-6 кг/час, скорость частиц – 100-450 м/с.

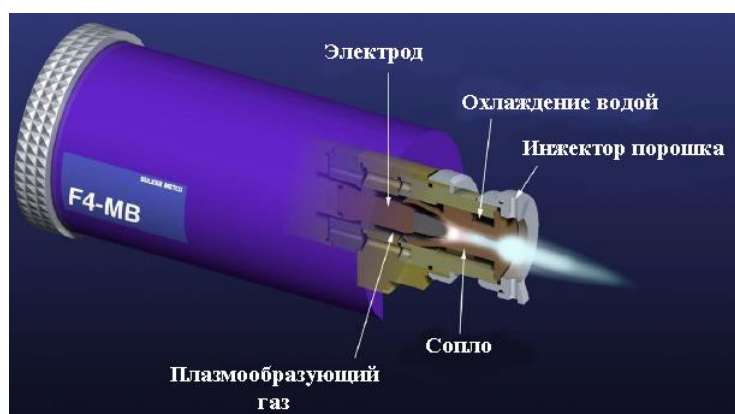


Рис.1.28. Типичный плазматрон F4-MB фирмы Sulzer Metco

Развитие техники плазменного напыления идет по нескольким направлениям [42], и одно из них, увеличение скорости напыляемых частиц. Увеличение давления плазмообразующих газов перед соплом приводит к повышению расхода газов и росту напряжения дуги, что позволяет достичь скоростей близких к скорости звука. Однако при этом уменьшается время пребывания частиц в горячей зоне плазмы и, соответственно, уменьшается и их температура. Поэтому другим направлением развития в комбинации с увеличением расхода газов, является деление одной дуги на три части, которое улучшает стабильность и равномерность плазменной струи, уменьшает износ электродов и позволяет увеличить суммарную мощность пламени. Типичным примером такого устройства является новейший плазматрон TriplexPro™-210 фирмы Sulzer Metcos одним анодом и тремя катодами, максимальной мощностью 100 кВт.

Третье направление развития состоит в организации осевой подачи порошка в плазматрон, что позволяет не только рационально использовать порошок, но и добиться полного проплавления порошкового материала и особенно керамического или тугоплавкого за счёт увеличения времени пребывания частиц порошка в плазменной струе. Объединение всех этих трёх направлений развития (большой расход газов, три дуги и осевой ввод порошка) выводит плазменное напыление на совершенно иной уровень качества покрытий с формированием состава и структур покрытий близких к получаемым в вакуумно-плазменных методах PVD и PAPVD.

При холодном газодинамическом (ХГН) напылении, осаждение покрытий осуществляется в сверхзвуковой струе воздуха так, что кинетическая энергия напыляемых частиц увеличивается, а термическая энергия уменьшается, что позволяет создавать почти полностью безоксидные покрытия. Порошок нагревается в струе с помощью внешнего нагревателя до температуры 600°C , приобретает пластичность, и при соответствующем давлении газа ускоряется в сверхзвуковом

сопле до скорости более 1000 м/сек и наносится непрерывным потоком на покрываемую поверхность. Производительность напыления составляет от 6 до 8 кг/час и выше.

Исследования [44] показали, что этим методом можно получить плотные покрытия с высокой адгезией. В отличие от других способов газотермического напыления, при которых порошок нагревается до температуры плавления, при холодном напылении порошок нагревается всего на несколько сот градусов. Поэтому окисления порошка и покрытия не происходит и содержание окислов в покрытии ничтожное, отсутствует и значительное тепловое воздействие на подложку. Сравнение рассмотренных основных методов газотермического напыления с максимальными достигнутыми к настоящему времени характеристиками по производительности (скорости осаждения), по данным [42], представлены в Таблице 5.

Таблица 5. Сравнительные характеристики методов нанесения ТСП [42]

	Процессы в газообразном состоянии					Процессы в растворах		Процессы в расплавленном или полу-расплавленном состоянии		
	PVD	PA-PVD	CVD	PACVD	Ионная имплантация	Золь-гель	Гальваническое покрытие	Лазер	Термическое напыление	Сварка
Скорость осаждения (кг/час)	До 0,5	До 0,2	До 1	До 0,5	-	0,1-0,5	0,1-0,5	0,1-1	0,1-10	3-5

Таким образом из проведённого в этой главе анализа следует, что, несмотря на большой прогресс, процессы влияния твёрдых смазочных материалов и ТСП на фреттинг-изнашивание еще недостаточно изучены. Необходимо увеличить объём экспериментальных исследований, направленных на понимание влияния как стандартных параметров фреттинга, таких как амплитуда скольжения, нормальная нагрузка, частота, режим контакта, шероховатость поверхности, относительная влажность и температура, так и параметров, связанных с составом и возможностями ТСП, их конструкции и технологии осаждения.

Объектом исследования настоящей работы является процесс фреттинг-изнашивания твёрдых смазочных покрытий, предназначенных для защиты элементов узлов трения ДЛА и ЭУ

Предмет исследования является методика экспериментальной оценки и исследования фреттинг-изнашивания ТСП, сформированных различными плазменными методами, с целью повышения фреттингостойкости узлов трения ДЛА И ЭУ.

Целью данной работы являлось повышение фреттингостойкости элементов ДЛА и ЭУ с использованием твёрдых смазочных покрытий.

Для достижения этой цели в работе необходимо решить следующие задачи:

1. Анализ процесса фреттинг-изнашивания и обоснование выбора твёрдых смазочных покрытий и плазменных методов их формирования для защиты от фреттинг-износа.
2. Исследование фреттинг-изнашивания ТСП, полученных плазменными методами, с использованием петель фреттинг-гистерезиса, построением карт фреттинга и энергетического подхода.
3. Разработка обобщенной методики исследования фреттинг-изнашивания ТСП для задаваемых условий эксплуатации.
4. Практическое использование исследованных ТСП для повышения фреттинго-стойкости и износостойкости элементов ДЛА и ЭУ.

ГЛАВА 2. СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБ ОСНОВНЫХ ПРОЦЕССАХ ФРЕТТИНГ-ИЗНАШИВАНИЯ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ С ПОКРЫТИЯМИ

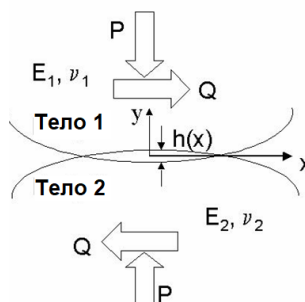
2.1 Анализ процессов контактного взаимодействия при фреттинге

2.1.1 Упругая модель фреттинга

Одним из основных мотивов для исследования фреттинга является роль процессов контактного взаимодействия различных материалов, используемых в аэрокосмических приложениях, в том числе в ДЛА и ЭУ, в которых, как известно, механические и термические нагрузки могут быть экстремальными, а плотность используемых материалов относительно небольшая. Кроме того, эти нагрузки чаще всего являются циклическими и проблемы фреттинга таких материалов, как титановые и алюминиевые сплавы, являются крайне актуальными.

Соприкасающиеся элементы, детали при этом могут нагружаться как нормально, так и по касательной, при действии так называемой тангенциальной нагрузки Q . Если эта нагрузка Q превышает произведение нормальной силы P и коэффициента трения μ , то скольжение деталей (тел) будет происходить по всей области контакта.

Часто, если детали плотно прилегают друг к другу (например, в креплении лопаток типа «ласточкин хвост»), то уже относительные смещения в масштабе микронов в присутствии циклической объемной нагрузки, приложенной к одному или к обоим контактирующим объектам, приведет к фреттинг-изнашиванию. На рис.2.1 показана схема нормального контакта двух упругих сферических тел. Приложение силы P , перпендикулярной границе раздела, приводит, чаще всего, к упругой деформации, которая увеличивает область контакта до половины ширины или радиуса сферы. Размеры области контакта определяются, как известно [1] геометрией и свойствами упругости материала обоих тел.



P -нормальная нагрузка; Q - тангенциальная нагрузка; E_1, E_2 – модули упругости; ν_1, ν_2 – коэффициент Пуансона контактирующих материалов соответственно; $h(x)$ – степень перекрытия (глубина внедрения).

Рис.2.1. Нормальный контакт двух упругих тел

Традиционно принято рассматривать, при анализе процесса контактного взаимодействия простой случай контакта сферического тела с плоскостью (рис.2.2)

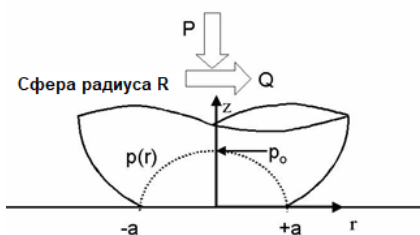


Рис.2.2. Статический контакт сфера-плоскость [46].

Приложение нормальной нагрузки P к контакту сфера-плоскость приводит к параболическому распределению давления $p(r)$ с нулевым давлением при $\pm a$ и максимальном давлении при $r=0$.

При наличии трения, т.е. при скользящем контакте и действующей силы P , появляется тангенциальная сила Q . Если $Q \geq \mu \cdot P$, появляющееся сдвиговое усилие (сила сцепления) q также становится параболической функцией и может быть написана как $q(r) = \mu \cdot p(r)$, как это показано на рис.2.3.

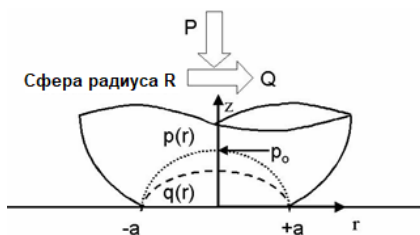


Рис.2.3. Контакт сфера-плоскость при полном скольжении при силе смещения $q(r)$ к распределенному давлению $p(r)$ [46].

Если $Q \leq \mu \cdot P$, то такого полного скольжения не происходит, однако сила сцепления q в этом случае ограничивается на краю контакта [45], т.к. добавляется встречное сопротивление и область скольжения будет уменьшена и располагаться между центральной областью схватывания (заедания) и краем контакта, как это показано на рис. 2.4, где радиус полуширины зоны схватывания обозначен как $\pm c$, а область скольжения лежит между a и c .

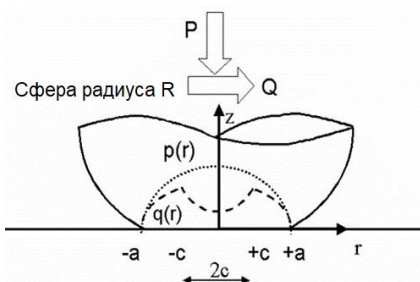


Рис.2.4. Контакт при $Q < \mu p$ (частичное проскальзывание)

В этой упругой модели фреттинга предполагается, что относительные смещения происходят в основном за счет микроскольжения на поверхности контакта и упругой деформации в объеме контактирующих тел. Рассмотренная идеализированная упругая модель фреттинга, развитая авторами работы [47], позволила с учетом теории Герца определить, что одновременно с действующей силой P приложенная тангенциальная сила Q создает в случае фреттинга тангенциальную силу сцепления $q(r)$ на контактной поверхности, которая имеет вид:

$$q(r) = \frac{Q}{2\pi \cdot a \cdot (a^2 - r^2)^{1/2}}, \quad (1)$$

где r - расстояние от центра контактной поверхности.

Из этого выражения следует, что величина $q(r)$ имеет особенность на внешней границе контактной поверхности, где $r=a$. Учитывая, что сила сцепления не может превышать силы трения $\mu \cdot p(r)$, можно утверждать, что на некоторых участках контактной поверхности будет проходить проскальзывание. Проскальзывание в соответствии с оценкой [48] происходит вне круга радиуса $r=a'$, определяемого выражением:

$$a' = a \cdot \left(1 - \frac{Q}{\mu \cdot P}\right)^{1/3}, \quad (2)$$

Для заданного $Q < \mu \cdot P$ (μ - статический коэффициент трения) существует также $a'(Q)$, при котором контактная поверхность характеризуется центральной окружностью с радиусом a' , окруженная кольцом скольжения, как это показано на рис.2.5а.

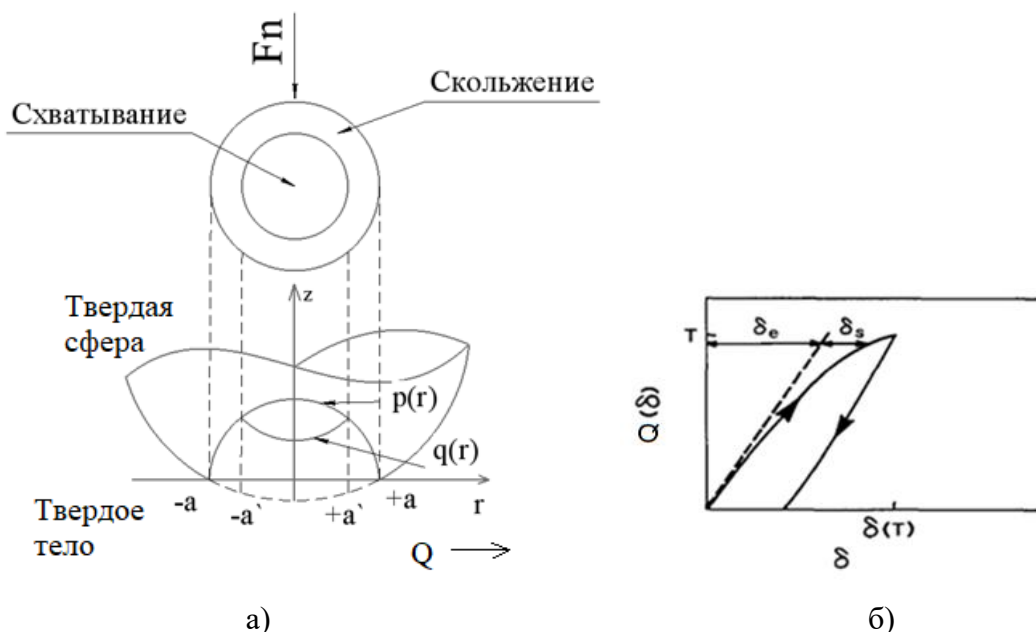


Рис.2.5. Фреттинг при контактной геометрии сфера-плоскость (а) и половина цикла фреттинг-теста Q - δ (б) [47].

Упругая деформация в сфере и полупространстве будет приводить к тангенциальному смещению δ центра сферы относительно фиксированной точки отсчета в полупространстве, вдали от зоны контакта.

Согласно [48], эта величина смещения может быть рассчитана по выражению:

$$\delta = \frac{3 \cdot k \cdot \mu}{2} \left(\frac{P^2}{E^2 \cdot R} \right)^{\frac{1}{3}} \left[1 - \left(1 - \frac{Q}{\mu \cdot P} \right)^{\frac{2}{3}} \right], \quad (3)$$

где k является функцией коэффициента Пуансона.

Из уравнения (2) следует, что a' приближается к нулю, когда приложенная тангенциальная сила Q приближается к силе трения $\mu \cdot P$, и равенство $Q = \mu \cdot P$ будет определять начало зарождающегося проскальзывания по всей площади контакта и поэтому уравнения (2) - (3) определены для области $0 \leq Q \leq \mu \cdot P$.

Когда тангенциальная сила увеличивается от нуля микроскольжение начинается на краю окружности контакта $r=a$ и проникает во внутрь до радиуса a' , заданного уравнением (2), а относительное смещение δ при этом начнет увеличиваться согласно уравнению (3). В ходе последовательной разгрузки тангенциальная сила постепенно уменьшается и скольжение меняет направление на обратное. Из рис.2.5б видно, что смещение отклоняется от упругой линии в каждой горизонтальной плоскости и суммарное смещение можно разложить на две составляющие:

$$\delta = \delta_e + \delta_s, \quad (4)$$

где δ_e - упругая (обратимая) составляющая, а δ_s - необратимая составляющая скольжения и при отсутствии скольжения $\delta = \delta_e$.

Как показано в работе [47] составляющая δ_s зависит от истории нагружения контакта. Поскольку в случае фреттинга сила Q циклически переключается между двумя значениями силы трения $+T$ и $-T$, где $T \leq \mu \cdot P$, таким образом, что зависимость Q от δ , не имея других экстремальных значений, будет образовывать замкнутый контур, как это показано на рис.2.6а.

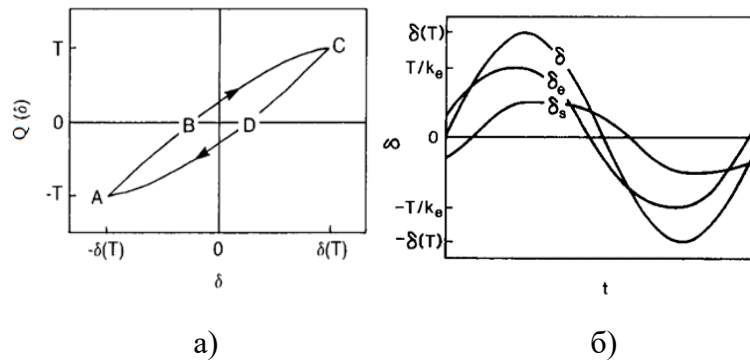


Рис.2.6. Гистерезисная петля фреттинга с учетом упругого смещения и микроскольжения (а) и изменении δ , δ_e и δ_s по времени t (б) полного цикла фреттинга [47].

На рис 2.6 б показаны изменения δ_e и δ_s по времени в течение цикла фреттинга, где δ полное смещение. Площадь ΔE внутри петли (на рис.2.6 а) представляет собой энергию, рассеиваемую за цикл фреттинга или называемой еще энергией диссипации.

Экспериментальная проверка, выполненная авторами [49] показала, что зависимости в случае взаимодействия твердых материалов (шарик и плоскость из твердой стали) справедлива. При экспериментах на металлах с разной твердостью и разной конфигурации контактов значение ΔE оказывалось значительно выше, чем предсказывает эта упругая модель. Это расхождение было объяснено упруго пластическим поведением в зоне контакта.

2.1.2. Уругопластическая модель фреттинга

Известны два основных способа проявления эффектов пластичности при фреттинг контактах: деформации шероховатости деталей в контактах и объемная деформация контактной зоны как базового материала, так и относительно толстых и мягких покрытий. Распределение нормальных и тангенциальных сил сцепления (рис.2.5) и их количественные оценки относятся к расчету упругости по Герцу для идеально гладких поверхностей. Качественное рассмотрение упругопластического деформирования подразумевает, что контактная поверхность делится на три зоны, меняющие соответственно условия контакта, как это показано на рис.2.7.

Как отмечается в [47] под действием силы сцепления $q(r)$ неровности (шероховатость) упруго деформируются в центральной зоне заедания, которая в этом случае окружена кольцом текучести, в котором неровности вышли из строя пластично, не ломаясь. Это кольцо текучести окружено кольцом скольжения, где неровности подвергаются разрушению при сдвиге, как и в упругой модели.

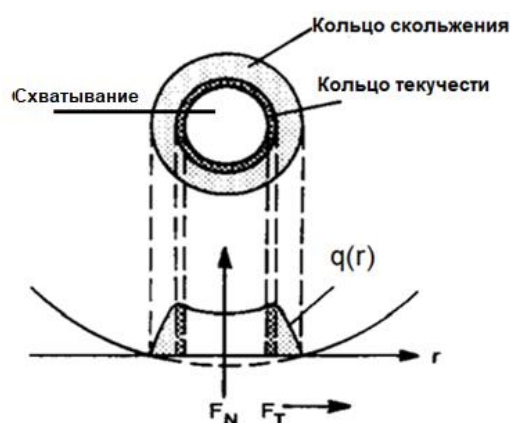


Рис.2.7. Фреттинг сфера-плоскость с кольцом текучести [48].

Кривая распределения $q(r)$ в нижней части рисунка позволяет представить кольцо текучести с закругленным переходом между заеданием и скольжением в отличие от резкого

перехода, показанного на рис.2.5. Для того, чтобы объяснить гораздо большие значения δ , особенно для лёгких металлов, предлагается рассмотреть упругую модель, но с добавлением в величину смещения при фреттинге пластический элемент δ_p , и тогда суммарное смещение будет иметь вид:

$$\delta = \delta_e + \delta_s + \delta_p, \quad (5)$$

Пластическое поведение фреттинг-контакта иллюстрируется схематически на рис. 2.8.

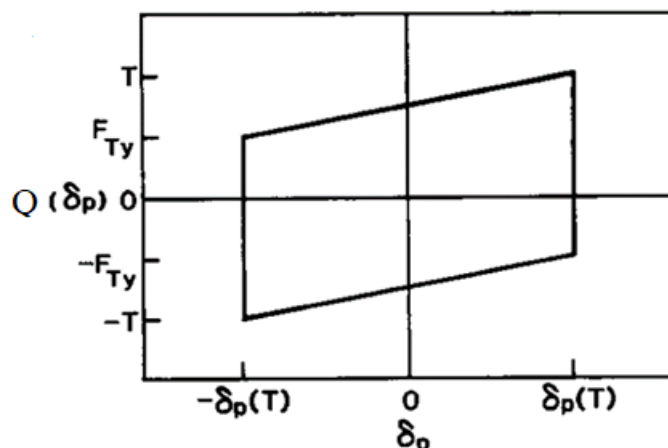


Рис. 2.8. Зависимость Q от δ_p на петле фреттинг-гистерезиса при пластическом смещении [47].

Величина F_{Ty} представляет собой предел «текучности при фреттинге» и зависит от геометрии контакта R , свойств материала (σ_y , E и ν) и от нормальной нагрузки P . F_{Ny} – нормальная сила текучности. Для принимаемой геометрии и материала существует три различных условия текучности:

- $|F_{Ty}|=0$ для $P > F_{Ny}$
 - $0 < F_{Ty} < \mu P$
 - $|F_{Ty}| > \mu P$
- (6)

Откуда следует, что пластическая деформация может существовать только при соблюдении первого и второго условий.

И в этом случае, согласно [47], площадь петли гистерезиса на рис.2.8 соответствует рассеиваемой энергии через пластическую работу и можно даже предположить, что происходит деформационное упрочнение с коэффициентом пластичности (наклепа) k_p :

$$k_p = \frac{(Q - F_{Ty})}{2 \cdot \delta_p \cdot Q}, \quad (7)$$

Полное смещение по-прежнему может быть отражено так, как показано на рис.2.9, подобном 2.6б, где представлены изменения по времени t составляющих суммарное смещение, только теперь для случая упругопластического фреттинга [50].

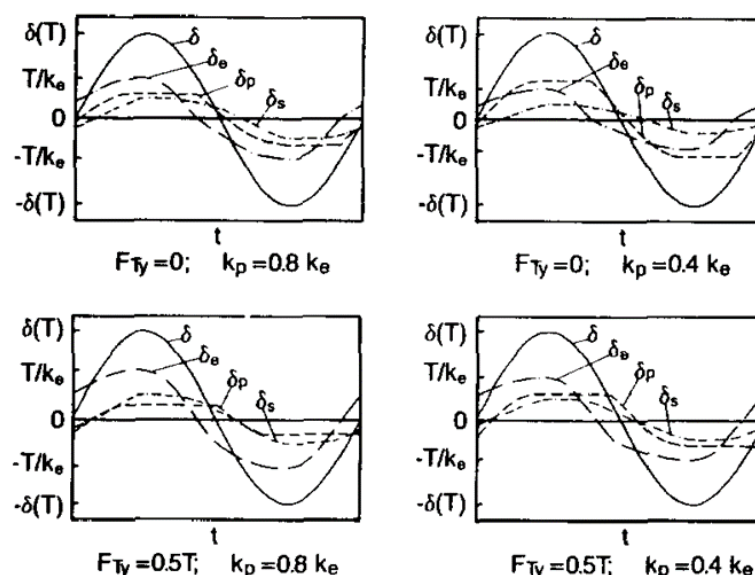


Рис.2.9. Изменение по времени составляющих смещения δ при упруго -пластическом фреттинге δ_e , δ_s и δ_p для двух значений предела текучести F_{Ty} и коэффициента упрочнения (наклепа) k_p [50].

Экспериментально полученные в настоящей работе изменение по времени F_{Tp} и D , а также петля при упруго-пластическом фреттинге представлена на рис.2.10.

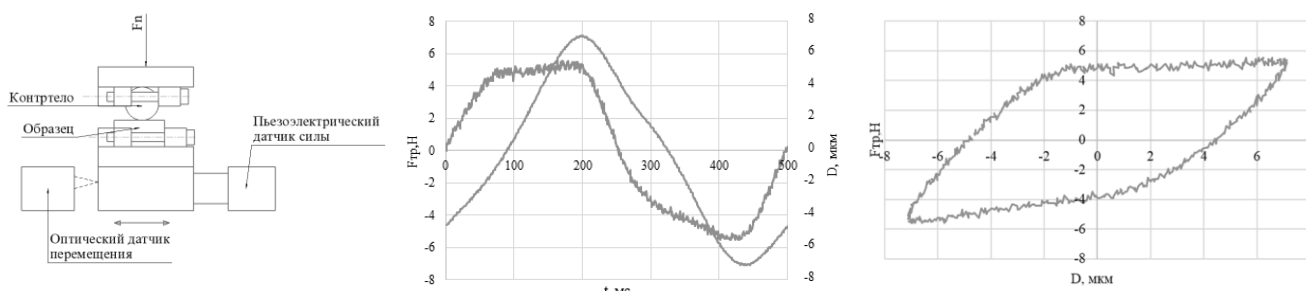


Рис. 2.10. Схема контакта сфера плоскость.

Рассмотренная упруго-пластическая модель при фреттинге основывается на механических представлениях о процессе и учитывает, в основном, свойства материала (B_u , E и N) и требует развития для учета процессов фреттинг-усталости и фреттинг-упрочнения. Однако полученные результаты анализа позволяют объяснить многие явления, протекающие при фреттинге, оценить в первом приближении возможности петель фреттинг-гистерезиса.

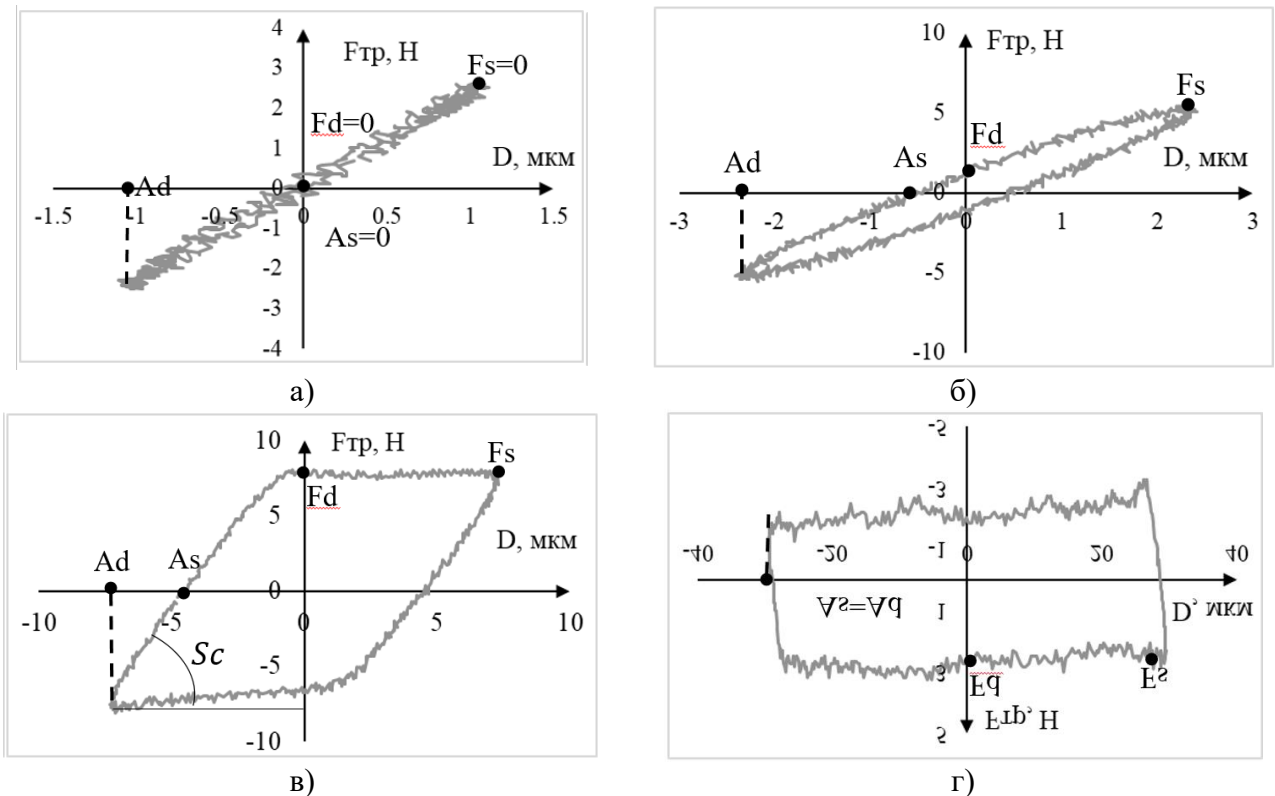
2.1.3. Анализ процесса фреттинг-изнашивания с использованием петель фреттинг-гистерезиса

Таким образом, в зависимости от условий нагрузки, свойств материала и окружающей среды, фреттинг может вызвать фреттинг-износ, который сочетает в себе все основные механизмы износа (таблица 1), фреттинг-коррозию, связанную с воздействием внешней среды, или фреттинг-усталость, которая сочетает поверхностную или объемную усталость [3-6]. Оба эти

явления значительно снижают срок службы элементов контактов трения при переменных нагрузках и вибрациях.

Форма петли фреттинг-гистерезиса (петлеобразное изменение силы трения в зависимости от относительного смещения) связана с основными режимами фреттинга и переходами между ними. Инициирование трещин и их распространение в основном связано с фреттингом частичного проскальзывания, в то время как износ поверхности и удаление материала фреттинг-изнашивания связано с фреттингом полного скольжения. Таким образом, в результате фреттинг-повреждения, представляющего собой сложное контактное явление на поверхностях фреттинг-контакта, появляются трещины и/или удаляется изношенный материал.

Формы петель фреттинг-гистерезиса, получаемые нами в ходе экспериментальных исследований различных пар трения с ТСП и без ТСП, представлены на рис.2.11 и связаны с основными режимами фреттинга и их анализ полезен для оптимального проектирования поверхностей, подверженных фреттинг-изнашиванию. С учетом рекомендаций работы [51] были определены основные параметры полученных петель фреттинг-гистерезиса и дано их определение.



As - амплитуда скольжения; Ad - амплитуда смещения; F_s - статическая (максимальная) сила трения; F_d - динамическая сила трения, измеренная при нулевом смещении и максимальной скорости скольжения; s – коэффициент скольжения

Рис.2.11. Изменение сил трения в зависимости от относительного смещения при различных режимах [51].

Как следует из рис. 2.11, форма петли фреттинг-гистерезиса связана со следующими основными режимами фреттинга и переходами между ними [52]:

- режим полного упругого схватывания (заедания) (рис. 2.11а), в котором амплитуда скольжения A_s равна нулю, и все части контакта остаются адгезивными и проскальзывание отсутствует на всем протяжении контакта; в данном случае петля сводится к прямой линии, т.к. заедание вызывает только упругую деформацию, т.е. упругая деформация- линейная, полностью восстанавливаемая и энергия системы в этом случае не рассеивается [52];
- режим частичного скольжения (эллиптический гистерезис) показан на рис. 2.11б; в этом случае при дистанционном смещении амплитуды центральная зона контакта представляет собой- зону схватывания (заедания), адгезивную зону, а внешняя её сторона-зона скольжения; такое частичное проскальзывание приводит к появлению напряжений и локализации повреждений, увеличивая вероятность зарождения трещин [51,52];
- режим фреттинга с полным скольжением (параллелограммный гистерезис) показан на рис 2.11в, когда амплитуда смещения становится больше, так что все части фреттинг-контакта скользят относительно контртела; полное скольжение приводит к снижению напряжений и сопровождается усиливающимся повреждением контактных поверхностей, в основном связано с износом и удалением материала; поскольку относительные смещения в этом случае всё ещё малы, то продукты износа не покидают интерфейс и вызывают эффект третьего тела, когда образующийся «мусор» притирается к сопрягаемым поверхностям [54];
- возвратно-поступательный режим скольжения (прямоугольный гистерезис, рис. 2.11г), называется ещё гистерезисом кулоновского трения, при котором большая часть мусора, создаваемая на интерфейсе, «выметается» из следа износа и накапливается на концах возвратно-поступательного движения вместе с некоторыми частицами, покидающими след пятна износа по бокам и, согласно [53], при этом захватываются лишь относительно небольшое количество «мусора» по следу износа.

Таким образом, существует взаимосвязь между формой гистерезиса и интенсивностью процесса изнашивания, позволяющая оценить фреттинг-изнашивание элементов машин, подвергающихся фреттингу. Умеренный износ, зарождение и распространение трещин связано с частичным скольжением, в то время как сильное изнашивание с преобразованием поверхности, износом и удалением материала больше связан с фреттингом полного скольжения.

Используя обозначения, принятые на рис.2.11 [54] можно определить коэффициент скольжения s , как отношение амплитуды скольжения A_s и амплитуды смещения A_d .

$$s = \frac{A_s}{A_d}, \quad (7)$$

И тогда режим $s \rightarrow 0$ характеризует состояние схватывания (заедания), который по мере увеличения значения s развивается в режим частичного, а затем и полного скольжения. Когда $s \rightarrow 1$ часть смещения, отвечающая за частичное скольжение, становится пренебрежимо малой по сравнению с амплитудой смещения в петле и система переходит в область возвратно-поступательного скольжения ($A_s = A_d$). На рис.2.12 показано графическое изображение режимов фреттинга на примере контакта сфера-плоскость.

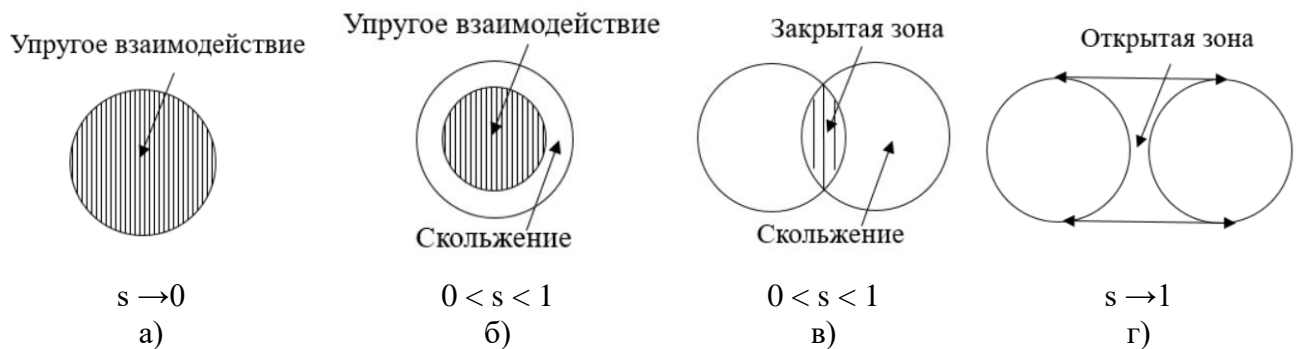


Рис.2.12. Виды контактного взаимодействия сфера-плоскость

На рис.2.12 а показан случай прямой пропорциональности между тангенциальной силой и смещением, которая имеет место при низкой амплитуде скольжения, и линейная зависимость соответствует зависимости нагружения-деформации упругого сдвига двух сопрягаемых макро-поверхностей. Это предполагает, что интерфейс поддерживается в этом случае с помощью соединенных схватыванием (заеданием) неровностей, которые могут быть пластически срезаны в направлении фреттинга, но вклад пластической деформации выступов в общую работу трения незначителен по сравнению с упругой деформацией основного материала.

Такое циклическое растяжение во время продолжающегося фреттинга, как уже отмечалось выше, может привести к зарождению и распространению поверхностных усталостных трещин, особенно если используются мало или слабо пластичные материалы [56].

Для амплитуд смещения, показанных на рис.2.12 б, контактные поверхности разделяются на центральную зону схватывания и окружающую кольцевую зону скольжения. Повреждения поверхности в области схватывания ограничиваются пластическим срезанием неровностей, а в области кольцевого скольжения наблюдается обширное трещинно-образование, располагаемое ближе к границе схватывание-скольжение.

Пресекающиеся поверхностные трещины высвобождают частицы износа на границе раздела, и эти отделившиеся частицы захватываются контактирующими поверхностями и

дробятся на более мелкие фрагменты. Эта фрагментация усиливается окислительными процессами и условия износа усугубляются благодаря более хрупкой природе оксидов, появляющимися в зоне контакта.

Переход к полному скольжению, а затем и к возвратно-поступательному (рис.2.12 г), определяется по соответствующему переходу к кинематическому трению (рис.2.12в). В точках начинающегося грубого скольжения все контакты неровностей разрываются во время каждого цикла, что при наличии такого обширного сдвига пластической поверхности приводит к образованию чешуек, которые в конечном итоге расслаиваются и отделяются от поверхности. В окислительных условиях, как, например, трение на воздухе, растрескивание и окисление частиц износа будет ускоряться за счет окисления частиц. Отсюда следует, что режим полного скольжения характеризуется зачастую обширным износом, и при этом фреттинг-изнашивание и окисление жестко связаны. Так появляется в контакте третье тело, формируя так называемую, как уже отмечалось выше, трибологически преобразованную структуру (ТТС), анализ формирования и деградации которой необходимы для контроля и прогнозирования износа, вызываемого фреттингом [57].

Таким образом, такие петли фреттинг-гистерезиса можно фиксировать и анализировать, проводя испытания на универсальных машинах трения (с помощью гидравлической системы растяжения сжатия, механических или электромагнитных вибраторов), в которой один из образцов совершает фреттинг-перемещение или возвратно-поступательное движение заданной амплитуды при заданной нагрузке на один из образцов.

На таких машинах трения могут быть реализованы любые контакты трения: плоскость по плоскости, шар по плоскости, цилиндр по цилиндру и др. Каждый цикл фреттинга характеризуется тангенциальной петлей нагрузка-перемещение, которая позволяет рассчитать энергию трения (разрушения) или называемую еще, как отмечалось выше, энергией диссипации. Варьирование такими режимами фреттинга, как амплитуда относительного скольжения, контактное давление, частота колебаний, параметры внешней среды и наличие смазки и твердых смазочных покрытий в том числе, позволяет с регистрацией параметров, извлекаемых из анализа петель фреттинга, построить различные карты фреттинга.

2.1.4. Карты фреттинга. Энергетический подход к анализу процесса.

Согласно [55,56] карта фреттинга – это диаграмма, показывающая соответствующие режимы в двух переменных: касательной силы и смещения образца с границами режимов, представляющие критические значения для перехода от одного режима к другому. Карты фреттинга используются для интерпретации экспериментальных результатов и правильно

составленная карта фреттинга трибосистемы облегчает выбор рабочих условий, необходимых для устранения проблем фреттинга контактной системы.

Поэтому исследование фреттинга, построение карт фреттинга происходит в два этапа [57]. Один этап состоит в исследовании реакции материалов (material response fretting material - MRFM), основанный на металлографическом исследовании трущихся поверхностей, измерении и исследовании повреждений в пятнах износа. Другой этап основан на непрерывной регистрации зависимости силы трения от перемещения в течение всего эксперимента и определение режимов изнашивания по виду петель и изменению их в динамике (running condition fretting map - RCFM), но использование этого метода связано с необходимостью использования критериев перехода от одного режима работы к другому. На рис.2.13 представлена диаграмма фреттинга, которая объединяет и объясняет эти два этапа исследований.

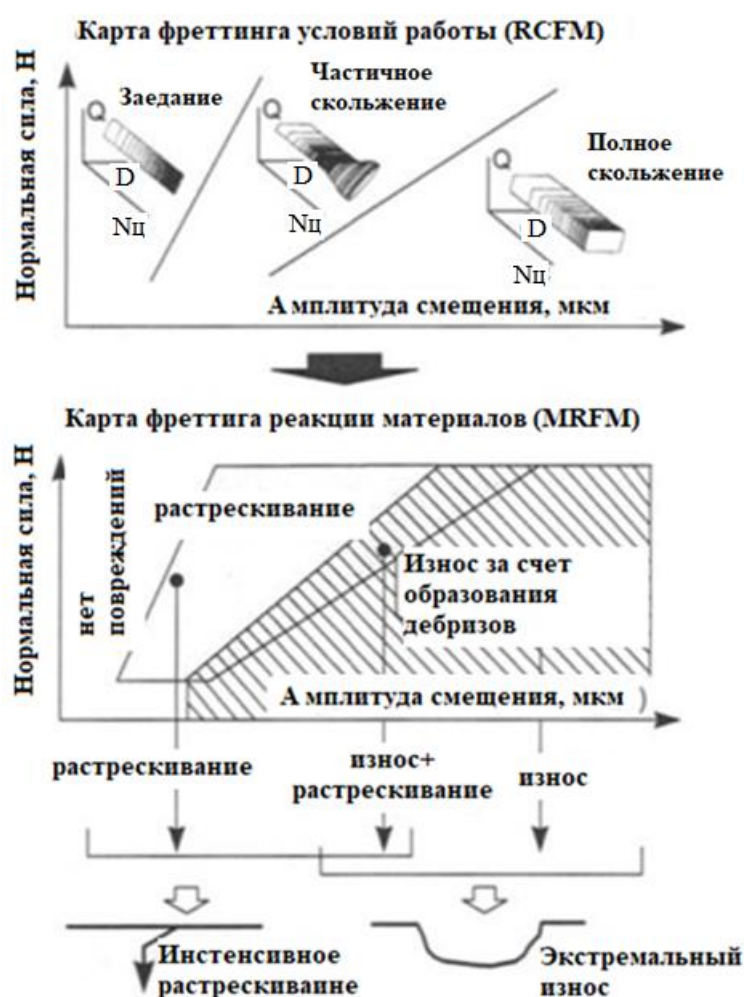


Рис. 2.13. Диаграмма фреттинга [58].

Экспериментальный подход требует количественной оценки объема износа по профилям получаемых пятен износа. Наблюдаемая эволюция объема износа в зависимости от накопленной

рассеянной энергии позволяет экстраполировать энергетические факторы износа и в дальнейшем прогнозировать износ [58]. Схема такого подхода показана на рис.2.14.

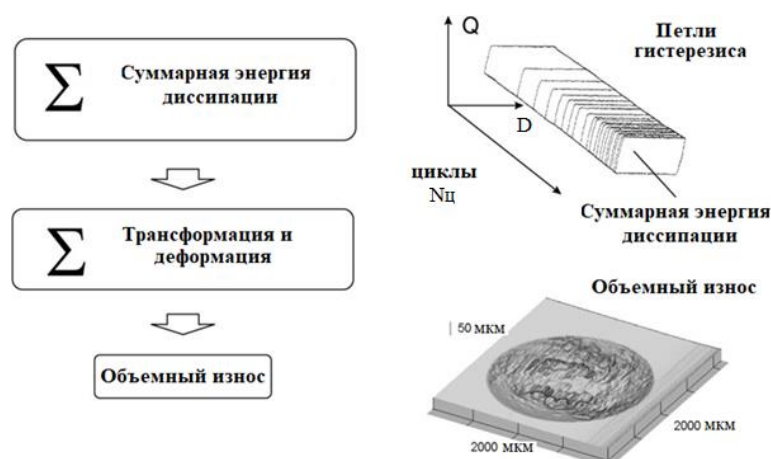


Рис.2.14 Энергетический подход- связь между рассеянной энергией и объемом износа [58].

Таким образом, развитие повреждений в зависимости от условий фреттинг-нагрузки (контакт сфера-плоскость) следующее: наименьшие амплитуды смещения приводят к частичному скольжению, способствующее растрескиванию, тогда как большие амплитуды способствуют возникновению состояния полного скольжения, которое в основном активирует износ, сопровождаемый образованием частиц износа («обломков»).

Одним из наиболее эффективных направлений, особенно с точки зрения разработки практических рекомендаций, является использование энергетического подхода для прогнозирования изнашивания материала, подверженного фреттинг-изнашиванию.

Отношение измеренного объемного износа материала в пятне износа W_v $\mu\text{м}^3$ к рассеянной энергии E_d по всем циклам фреттинга N_c при неизменном механизме разрушения является постоянной величиной и определяется как $\alpha = W_v / \Sigma E_d$ и носит название коэффициента объемного износа [59]. Пример определения этого коэффициента для пары трения шар Al_2O_3 – плоскость TiN и нержавеющей сталь HSS показан на рис.2.15.

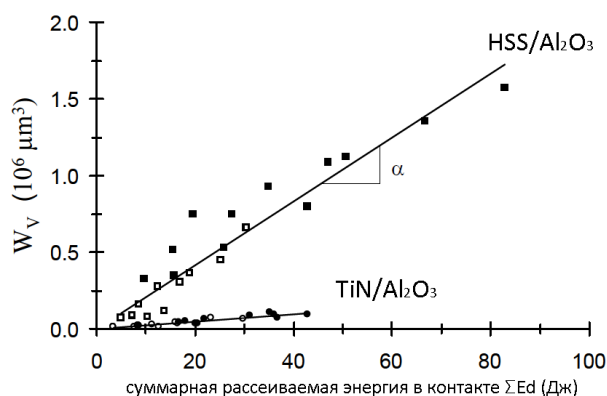


Рис.2.15. Энергетический коэффициент объемного износа α для разных поверхностей [59].

Основное достоинство использования этого коэффициента α заключается в том, что он не зависит от условий нагружения и позволяет прогнозировать изнашивание материала при фреттинге.

2.2. Анализ фреттинг-изнашивания с использованием индекса скольжения

Итак, общепринятое определение фреттинга – это относительные циклические движения с малой амплитудой, происходящие между двумя колеблющимися поверхностями. И если до недавнего времени под малой амплитудой «в западной литературе», понимались ее «малые» значения (до 300 мкм), а в отечественной до 1000 мкм, то исследования с использованием атомносиловой микроскопии позволили обнаружить фреттинг с максимальной амплитудой около 100 нм [61]. Отсюда следует, что фреттинг стоит рассматривать и определять как относительное циклическое движение между двумя поверхностями, имеющие неравномерное распределение локального относительного смещения в месте их контакта, поэтому и было введено новое понятие «индекс скольжения» [61].

На основе обработки многочисленных экспериментальных данных [62] были идентифицированы три различных режима скольжения: схватывание (заедание), частичное проскальзывание и полное скольжение, которые определяют форму и содержание фреттинг-повреждения. Эти режимы отличаются характерными петлями трения, показывающими зависимость силы трения от относительного смещения в контакте в течение полного цикла фреттинга.

Авторы [62] считают, что классическое определение, которое ограничивает фреттинг возвратно-поступательным движением «малой амплитуды» не совсем справедливо, поскольку масштаб «малого» четко не определен. Кроме того, утверждается, что из-за использования различных лабораторных стендов для моделирования фреттинга сильно затруднено сравнение результатов, полученных в разных лабораториях.

Поэтому и был предложен [61] и введен единый подход к фреттингу на основе нового безразмерного критерия подобия, названного индексом скольжения. Из контура трения, изображенного на рис.2.16 можно определить основные параметры, определяющие условия скольжения, и с их помощью записать выражение для индекса скольжения как $\delta = Ad \cdot Sc / P$.

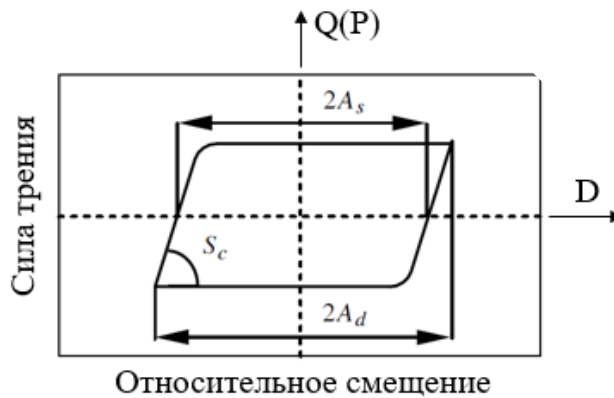


Рис.2.16. Характеристики петли фреттинга.

Q и D на этом рисунке означают тангенциальную силу и относительное перемещение (смещение) соответственно. A_s – амплитуда полного скольжения, характеризующее форму петли трения, которое является функцией всех независимых управляющих параметров в том числе и приложенной машиной трения (фактической) амплитуды смещения A_d .

В работе утверждается [62], что безразмерный индекс скольжения может однозначно представлять все различные режимы скольжения, а также переход от фреттинга к возвратно-поступательному скольжению для каждой конкретной системы.

Из контура (петли) трения, представленного на рис.2.16, были получены соотношения, определяющие условия скольжения. Амплитуда скольжения A_s , характеризующая форму петли трения, является функцией всех независимых управляющих параметров, а именно амплитуды приложенного смещения A_d , нормальной нагрузки P и упругого наклона петли трения S_c , представляющей собой тангенциальную жесткость контактного интерфейса и основания машины трения и таким образом: $A_s = f(A_d, P, S_c)$.

Из трех определяющих параметров A_d , P , S_c , два первых имеют независимые значения и тогда выражение A_s может быть записано в виде [61]:

$$A_s = A_d \cdot s \cdot \left(\frac{A_d \cdot S_c}{P} \right) \quad (8)$$

, где $s = A_s/A_d$ – безразмерный коэффициент скольжения, $S_c = |P| |A_d|^{-1}$ – размерный параметр Н/мкм. Из этого выражения следует, что безразмерный индекс скольжения может быть выражен как $\delta = A_d \cdot S_c / P$.

Поэтому этот предложенный [61] индекс скольжения может рассматриваться как единый критерий, обеспечивающий унифицированный подход к фреттингу практически для любой системы, определяемой размерами (макро-, микро- и нано-), любых условий нагружения, свойств материала и окружающей среды. Соотношение между отношением (коэффициента скольжения) s и индексом скольжения δ было определено на основании обработки многочисленных экспериментальных данных и выглядит следующим образом, $s = 1 - \frac{1}{2\delta}$, при $\delta \geq 0,5$.

Демонстрация корреляция между коэффициентом скольжения s , индексом скольжения δ и режимом фреттинга представлена в Таблице 6.

Таблица 6. Корреляция между коэффициентом скольжения s , индексом скольжения δ и режимом фреттинга [61].

Индекс скольжения, δ	Коэффициент скольжения, s	Режим трения фреттинга
$\delta \leq 0,5$	$s \rightarrow 0$	Заедание
$0,5 < \delta \leq 0,6$	$0 < s \leq 0,17$	Частичное скольжение-фреттинг режим
$0,6 < \delta \leq 0,8$	$0,17 < s \leq 0,38$	Переход от частичного к полному скольжению
$0,8 < \delta \leq 10$	$0,38 < s \leq 0,95$	Полное скольжение-фреттинг режим
$10 < \delta \leq 11$	$0,95 < s \leq 0,955$	Переход от фреттинга к возвратно-поступательному скольжению
$\delta > 11$	$s \rightarrow 1 (s > 0,955)$	Возвратно-поступательное скольжение

Таким образом, фреттингостойкость элементов машин и механизмов, подверженных фреттинг-изнашиванию, можно оценить по форме петли фреттинг-гистерезиса, поскольку существует сильная корреляция между условиями фреттинг-изнашивания и режимами фреттинга, и однозначно описывается коэффициентом скольжения s или индексом скольжения δ , которые следует отслеживать в ходе процесса фреттинг-изнашивания.

ГЛАВА 3. МАТЕРИАЛЫ, МЕТОДИКИ И ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

3.1. Материалы образцов, модельные образцы.

Для исследований в качестве подложек использовались различные материалы: титановые сплавы ВТ6 и ВТ9, нержавеющая сталь 95Х18, алюминиевый сплав АМГ6 и АД1. Выбор этих сплавов обусловлен частотой их использования в составе ДЛА и ЭУ. Керамика SiAlON, как одна из перспективных керамик, для использования в составе узлов трения ГТД, обладающая стабильностью при высоких температурах (1500-1800 °С), высокими показателями коррозионной, жаро- и износостойкости, значительной твердостью и прочностью, стойкостью к агрессивным средам. Химический состав материалов приведен в Таблицах 7-12. Образцы получали механической обработкой из заготовок в состоянии поставки и представляли собой диски или пластины.

Таблица 7. Состав сплава ВТ6.

Марка сплава	Химический состав в % материала										
ВТ6	Fe	C	Si	V	N	Ti	Al	Zr	O	H	Примесей
	До 0.6	до 0.1	до 0.1	3.5 - 5.3	до 0.05	86.45 - 90.9	5.3 - 6.8	до 0.3	до 0.2	до 0.015	прочих 0.3

Таблица 8. Состав сплава ВТ9.

Марка сплава	Химический состав в % материала										
ВТ9	Fe	C	Si	Mo	N	Ti	Al	Zr	O	H	Примесей
	до 0.25	до 0.1	0.2 - 0.35	2.8 - 3.8	до 0.05	86.15 - 89.9	5.8 - 7	1 - 2	до 0.15	до 0.015	прочих 0.3

Таблица 9. Состав сплава 95Х18.

Марка сплава	Химический состав в % материала									
95Х18	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Ti	Cu	
	0.9 - 1	до 0.8	до 0.8	до 0.6	до 0.025	до 0.03	17 - 19	до 0.2	до 0.3	

Таблица 10. Состав сплава АМГ-6.

Марка сплава	Химический состав в % материала									
АМГ-6	Fe	Si	Mn	Ti	Al	Cu	Be	Mg	Zn	Примесей
	до 0.4	до 0.4	0.5 - 0.8	0.02 - 0.1	91.1 - 93.68	до 0.1	0.0002 - 0.005	5.8 - 6.8	до 0.2	каждая 0.05;

Таблица 11. Состав сплава АД-1.

Марка сплава	Химический состав в % материала							
	Fe	Si	Mn	Ti	Al	Cu	Mg	Zn
АД-1	до 0.3	до 0.3	до 0.025	до 0.15	min 99.3	до 0.05	до 0.05	до 0.1

Таблица 12. Состав сплава SiAlON.

Марка сплава	Химический состав мас. %		
	α -SiAlON	β - SiAlON	TiN
SiAlON+TiN	71	9	20

3.2. Плазменные установки формирования ТСП

Установка магнетронного распыления

Метод магнетронного осаждения, относящийся к методам нанесения покрытий в вакууме с помощью аномального тлеющего разряда, позволяет формировать покрытия различного химического состава, зависящего от используемых мишеней и реакционных газов, и конструкции (многослойной, градиентной и т.д.). Толщина получаемых слоев обычно ограничивается величиной 10 мкм

На рис.3.1 приведена используемая в работе схема установки (МАИ каф. ТиСАПРМП) УВМ-700-4М для формирования тонкопленочных покрытий методом магнетронного распыления, обеспечивающей проведение напыления покрытий как в постоянном, так и импульсном (среднечастотном, 50 кГц) режимах работы планарных магнетронных распылительных систем (МРС).

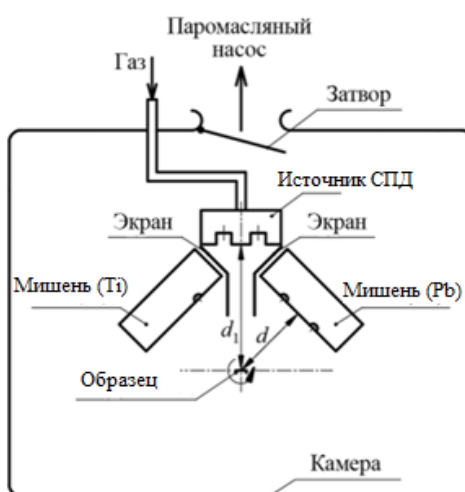


Рис. 3.1. Установка магнетронного распыления.

Установка плазменного напыления

Позволяет формировать толстые (~ 100 мкм) композитные многослойные покрытия, за счет большой номенклатуры порошковых материалов. Метод обладает высокой производительностью, но существуют проблемы по нанесению покрытий на внутренние поверхности, связанные с габаритами плазменных горелок.

Нанесение толстослойных ТСП осуществлялось с использованием установки ООО «ТСЗП», схема которой представлена на рис.3.2. Процесс напыления проводился в специальной камере с размерами 2000×700×1000, оборудованном технологическими приспособлениями, позволяющими обеспечить: ручное и автоматическое (построчное) перемещение стола с образцами, ручное и автоматическое перемещение плазменной горелки (плазматрона) с регулируемой скоростью от 1,5 до 6 м/мин, подъем и опускание плазменной горелки для изменения дистанции напыления. На столе был установлен электродвигатель с патроном, позволяющий наносить покрытия на тела вращения с регулируемым числом оборотов в пределах от 70 до 30 об/мин.

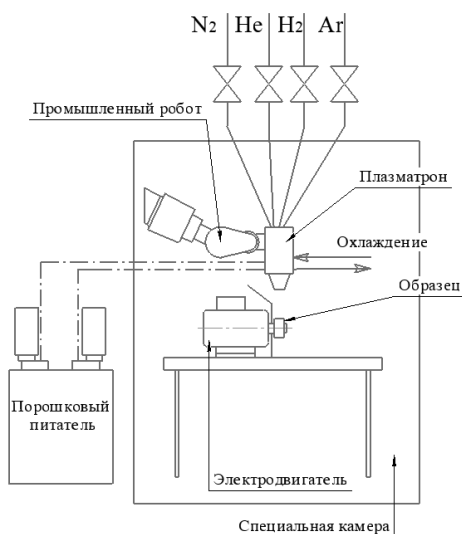


Рис. 3.2. Схема установки плазменного напыления

Установка плазменного напыления оборудована управляющими консолями, предусматривающими управление четырьмя плазмообразующими газами: аргон, азот, гелий и водород, порошковыми питателями фирм “Plasma Technik” и “Plasmadyne”, плазматроном типа F4, с максимальной мощностью до 55 кВт, холодильником- системой замкнутого охлаждения на основе бидистиллята и фреонового холодильника с воздушным конденсатором (хладопроизводительность- 40 кВт) и источником питания.

Комбинированная установка CAD и PACVD

На рис. 3.3. изображена принципиальная схема технологической установки Platit PI311 (МГТУ «СТАНКИН»), которая была использована для нанесения покрытий на керамическую подложку из SiAlONa.

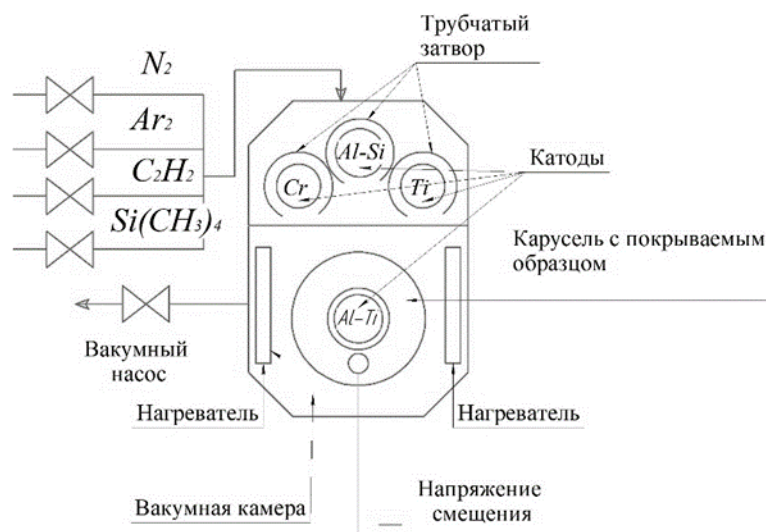


Рис. 3.3. Установка Platit PI 311, Швейцария

Эта установка позволяет наносить покрытия по двум технологиям: PVD – парофазное испарение материала катода в плазме газового разряда (метод CAD) и его последующая конденсация при взаимодействии с реакционными газами (осаждение нитридных пленок в азото-аргоновой газовой смеси), PACVD - газофазное осаждение посредством химической реакции и разложения компонентов газовой смеси при ассистировании плазмой тлеющего разряда (осаждение Si содержащих аморфных плёнок аморфного гидрогенизированного углерода из газовой смеси ацетилена, аргона, азота и тетраметилсилана). Тлеющий разряд обеспечивает повышение скорости осаждения покрытий до ~ 10 мкм/час при достаточно высокой чистоте получаемого материала по сравнению с другими методами плазменного ассистирования (дуговым и микроволновым). Наличие 4-х катодов (1-го центрального на основе Al-Ti и 3-х периферийных катодов на основе Ti, Al-Si и Cr) позволяет наносить пленки разнообразного состава.

Установка микродугового оксидирования

Покрытия, сформированные методом микродугового оксидирования на вентильных металлах, могут удовлетворять различным конструкционным, технологическим и эксплуатационным требованиям, таким как: микротвердость, износостойкость, малый коэффициент трения, электроизоляция, эрозионная и коррозионная стойкость, высокие адгезионные свойства. При этом важным преимуществом МДО покрытий является то, что эти покрытия в основном состоят из твердых кристаллических фаз, расположенных в матрице более

мягких фаз окислов металлов, входящих в состав сплава и электролита. Такое строение обеспечивает высокую микротвердость покрытия, износо- и коррозионную стойкость, теплозащитные и электроизоляционные свойства.

Формирование керамических покрытий на алюминиевых сплавах, в этой работе, происходило на установке МДО (рис.3.4), разработанной в лаборатории кафедры 205 «Плазменные технологии покрытий», состоящей из вытяжного шкафа с электролитической ванной и источника питания, обеспечивающего подачу высокого (до 1000 В) асимметричного переменного напряжения между деталью и ванной, заполненной электролитом.

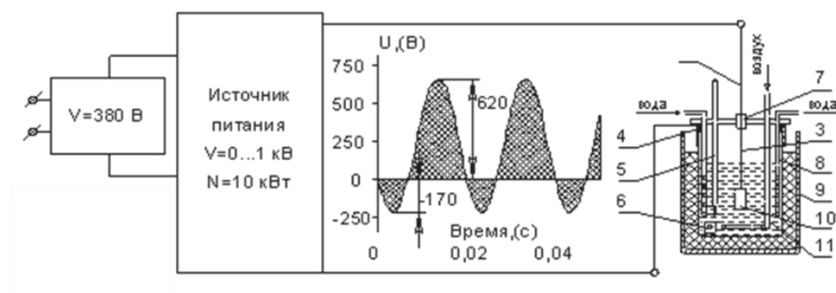


Рис. 3.4. Схема установки МДО

3.3. Оборудование и определение свойств материалов и покрытий

Толщина покрытий, сформированных в МРС, измерялась интерферометрическим методом по уступу, сформированному на образце-свидетеле, с помощью 3D-профилометра поверхности MicroHAM-100.

Измерение толщины покрытий, полученных методом МДО, а также покрытий, полученных плазменным напылением, производилось на металлографическом шлифе поперечного сечения образца с покрытием (прямой срез) с помощью оптического конфокального микроскопа Olympus LEXT OLS 5000.

Металлографическая подготовка, в рамках которой изготавливались шлифы поперечного сечения образцов с покрытиями, подразделялась на следующие этапы: отрезка образца необходимой величины; удаление заусенцев, чистка, промывка, сушка отрезанного образца; заливка/запрессовка в удерживающий компаунд (смола); шлифование и полирование.

Отрезание образца осуществлялось с использованием полуавтоматического низкоскоростного отрезного станка фирмы Buhler IsoMet Low Speed, оснащенного набором отрезных алмазных кругов на металлической основе. Низкая скорость резания круга позволила уменьшить повреждение образца, этому же способствовало точное позиционирование образца в оправке.

Заливка/запрессовка проводилась двумя способами: для холодной заливки использовалась система вакуумной импрегнации CitoVac фирмы Struers, для горячей запрессовки применялся пресс CitoPress-1 фирмы Struers с программированием режима.

Шлифование/полирование образца осуществлялось на автоматизированном шлифовально-полировальном станке LaboPol-4 с дозатором LaboDoser фирмы Struers. Для последовательного шлифования материала использовались круги с абразивом разных размеров.

Топографию поверхности керамических образцов из SiAlONa с различными покрытиями анализировали на профилометре BrukerDektakht, в системе которого предусмотрена электромеханическая схема измерения с использованием перемещения щупа с алмазным наконечником по поверхности образца. Требуемая область сканирования, скорость движения и сила нажатия стилуса программировались, а специализированное программное обеспечение позволило сформировать рельефные изображения исследуемых керамических образцов в формате 3D.

Определение шероховатости поверхности и измерение объема изношенного образца. Измерение объёмного износа и визуальная оценка фреттинг-повреждений проводилась с помощью оптического конфокального микроскопа Olympus LEXT OLS 5000 (рис.3.5.). Данный микроскоп позволяет измерять шероховатость поверхности, определять глубину пятен фреттинг-изнашивания и величину объёмного износа, а также оценивать величины объёма перенесённого материала с образца на контртело.



Рис. 3.5. Оптический конфокальный микроскоп

Структура и химический состав. Элементный состав и морфология разработанных покрытий и поврежденных поверхностей после трибологических испытаний проводилась на сканирующем электронном микроскопе EVO-40 Carl Zeiss (рис.3.6.) с приставкой для энергодисперсионного анализа INCA (Oxford instr.).



Рис. 3.6. Сканирующий электронный микроскоп

Методика измерения нанотвердости покрытий, полученных на керамике SiAlON. По схеме наноиндентирования алмазным индентором Берковича на нанотвердомере CSEM были определены твердость по шкале Мартенса (НМ) и модуль упругости нитридных и а-C:H:Si покрытий. Глубина вдавливания во время испытаний поддерживалась на уровне 100 нм. Время нагрузки-разгрузки составило 50 с, приложенная нагрузка 1,0 мН. Количественное значение нанотвердости рассчитывалось с помощью сертифицированного программного обеспечения CSEM.

Микротвердость HV покрытий TiN-Pb определялась на микротвердомере Micromet 5101 фирмы «Buehler» (США) по ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007 при нагрузке 0,49 Н.

Структура и фазовый состав полученных покрытий исследовался на рентгеновском дифрактометре ДРОН-4 в $\text{CuK}\alpha_{1+2}$ излучении в непрерывном режиме в диапазоне углов 2θ от 15° до 90° при шаге сканирования $0,013^\circ$ ($\Delta 2\theta$).

Измерение массы образцов проводилось на весах Vibra 220С (Япония) ($dm = 0,0001$ г).

3.4. Оборудование и методики определения фреттингостойкости

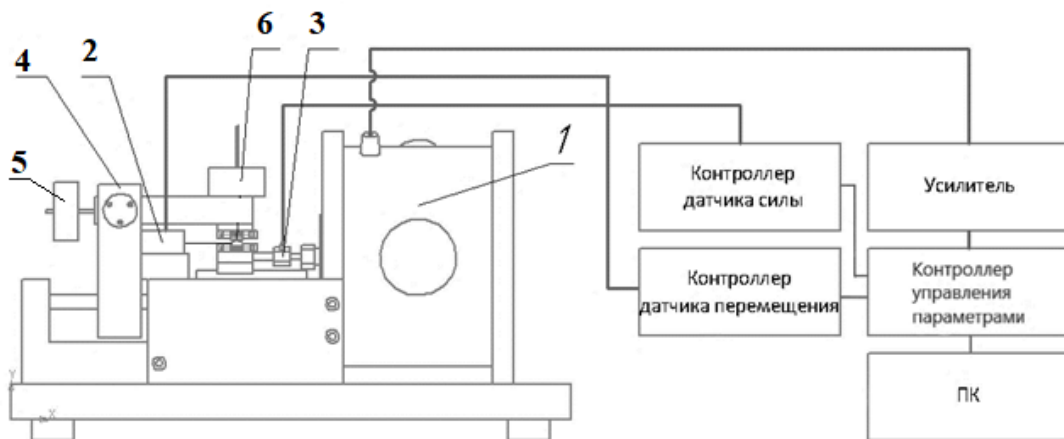
Износостойкость и фреттингостойкость образцов определялась на специальных машинах трения (1401 и 3308), в которых реализована схема возвратно-поступательного движения образцов с различными типами контакта.

Машина трения 1401 позволяет реализовывать следующие параметры испытаний на фреттинг-износ: нормальная нагрузка до 200 Н, частота до 100 Гц, амплитуда от 1,5 мкм до 500 мкм и испытывать образцы в четырех режимах: упругое взаимодействие, частичное скольжение, полное скольжение, возвратно-поступательное скольжение.

Машина трения 3308 позволяет реализовывать следующие параметры испытаний: частота до 20 Гц; перемещение от 0,1 до 2 мм; нормальная нагрузка до 220Н и испытывать образцы в режиме возвратно-поступательного скольжения.

Перед началом эксперимента образцы обезжиривались этиловым спиртом. После окончания эксперимента производилось фотографирование пятен износа и визуальное описание повреждений с помощью оптического конфокального микроскопа Olympus LEXT OLS 5000.

Машина трения 1401 разработана в лаборатории плазменные технологии покрытий каф.205 МАИ [63]. Она позволяет моделировать условия возвратно-поступательного фреттинг-изнашивания и состоит из (рис.3.7) электромагнитного вибратора 1, который обеспечивает возвратно-поступательные перемещения одного из образцов. Системы нагружения в виде уравновешиваемого балансом 5 рычага 4, передающего в место контакта нормальную 6 нагрузку, которая регулируется грузами различной массы. Системы регистрации и контроля параметров эксперимента включает: усилитель синусоидального сигнала (MMF VEB METRA), пьезоэлектрический датчик силы 2 PCB Piezotronic 208B ($F_{max} = \pm 200Н$) и контроллер сигнала PCB Piezotronic 482A22, лазерный датчик перемещения 3 Keyence LC2420 ($D_{max} = \pm 250\mu м$, $\Delta = 0,01\mu м$) с контроллером Keyence LC2400A; контроллер управления параметрами NImyRIO с разработанным программным обеспечением [64], на которое было получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [65].



1 – электромагнитный вибратор; 2 – пьезоэлектрический датчик силы; 3 – лазерный датчик перемещения; 4 – уравновешенный балансом рычаг; 5 – место контакта;

Рис. 3.7. Машина трения для исследования фреттинг-износа.

Программное обеспечение предназначено для управления машиной трения, определения коэффициента трения (μ) и механизмов взаимодействия тел; по средствам специального математического аппарата, который представлен схематически в виде блок схемы (рис. 3.8).

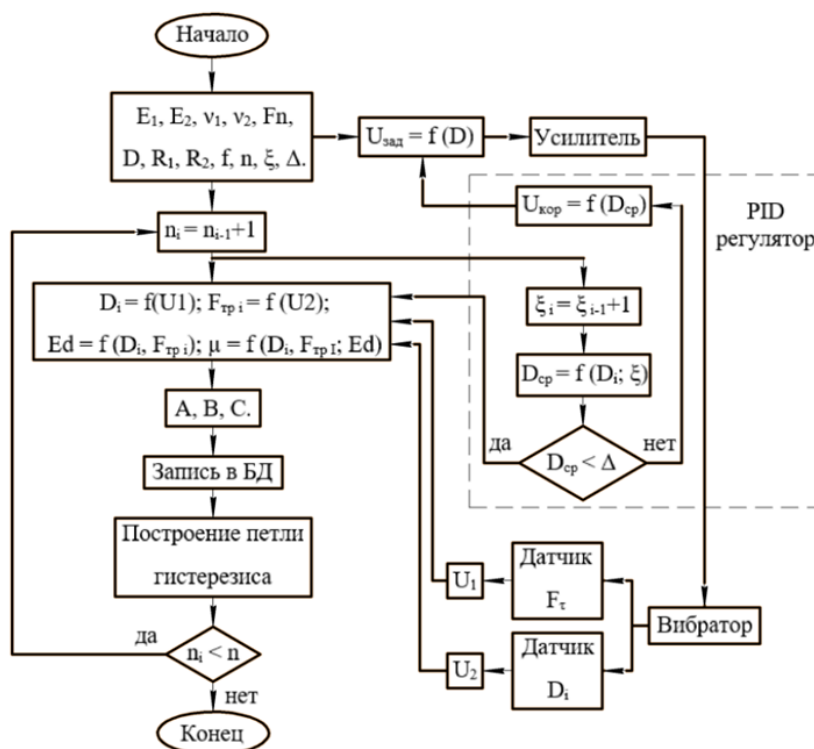


Рис. 3.8. Блок-схема расчета основных параметров фреттинг-изнашивания.

Первоначально задаются следующие параметры (рис. 3.9.): тип контакта - сфера/плоскость или цилиндр/цилиндр; E_1, E_2 - модуль упругости трущихся материалов; ν_1, ν_2 - коэффициенты Пуассона; F_n - нормальная нагрузка; ξ - число осредняемых точек; D - относительное перемещение трущихся тел; f - частота перемещений; n - количество циклов; R_1, R_2 - радиусы контактирующих тел; Δ - доверительный интервал перемещения, где 1 - образец, 2 - контробразец.

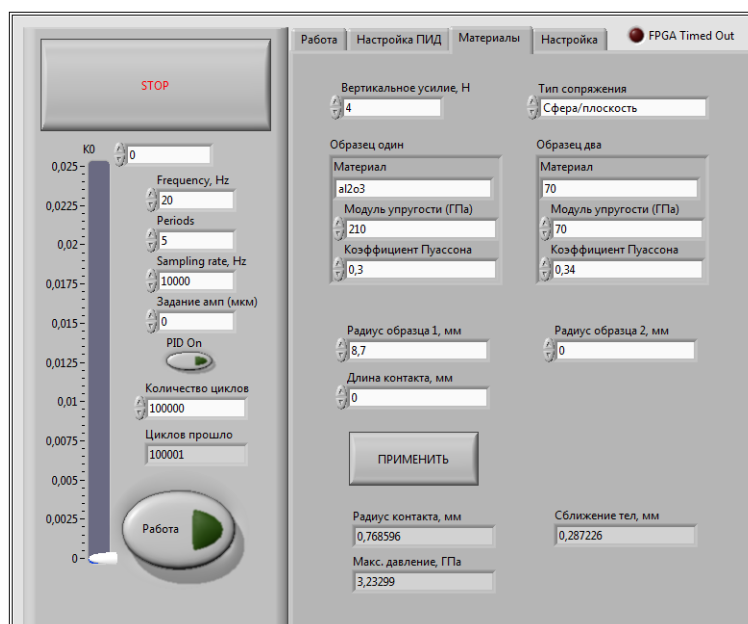


Рис. 3.9. Интерфейс программного обеспечения.

Далее в контроллере NI myRIO формируется сигнал, $U_{зад}=f(D)$, который передается на электромагнитный вибратор, осуществляющий возвратно-поступательные движения, реализуя при этом процесс фреттинг-изнашивания. Данные процесса считываются пьезоэлектрическим датчиком силы и лазерным датчиком перемещения (рис. 3.10.), создавая сигналы $U1(F_{ti})$ и $U2(Di)$, изменение которых по времени можно представить в виде графика (рис.2.10), аналогичному в упруго-пластической модели Герца-Миндлина-Вингсбо. Поступающие сигналы с датчиков преобразуются на контроллере NI myRIO в петлю гистерезиса (рис.2.10). На рис.3.11 представлены примеры получаемых петель во время испытаний, каждая из которых характерна для режима фреттинг-взаимодействия.

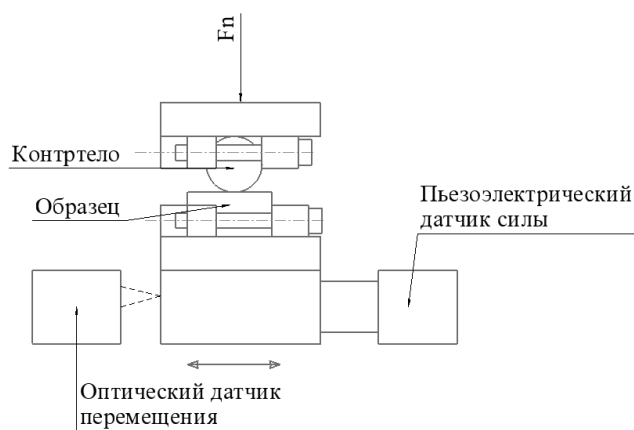


Рис. 3.10. Приспособление для фиксации образцов пары трения.

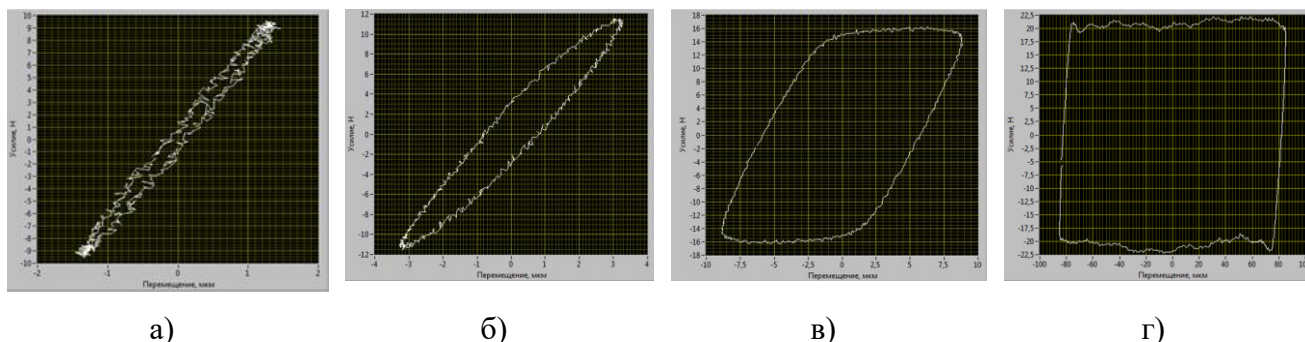


Рис. 3.11. Формы петель гистерезиса: а – упругое взаимодействие, б - частичное скольжение, в - полное скольжение, г – возвратно-поступательное скольжение.

По форме петель гистерезиса можно рассчитать следующие энергетические показатели: коэффициент скольжения (s) и индекс скольжения (δ), коэффициент энергии (ER).

Коэффициент трения рассчитывался как отношение энергии, рассеиваемой в контакте за один цикл трения, к полной энергии, заданной как произведение полного относительного смещения образцов на удвоенную нормальную силу.

$$\mu = \frac{E_{di}}{2DF_n} \quad (9)$$

где E_{di} энергия, рассеиваемая в контакте за один цикл трения. Величина рассеиваемой энергии рассчитывается по мгновенным значениям параметров трения:

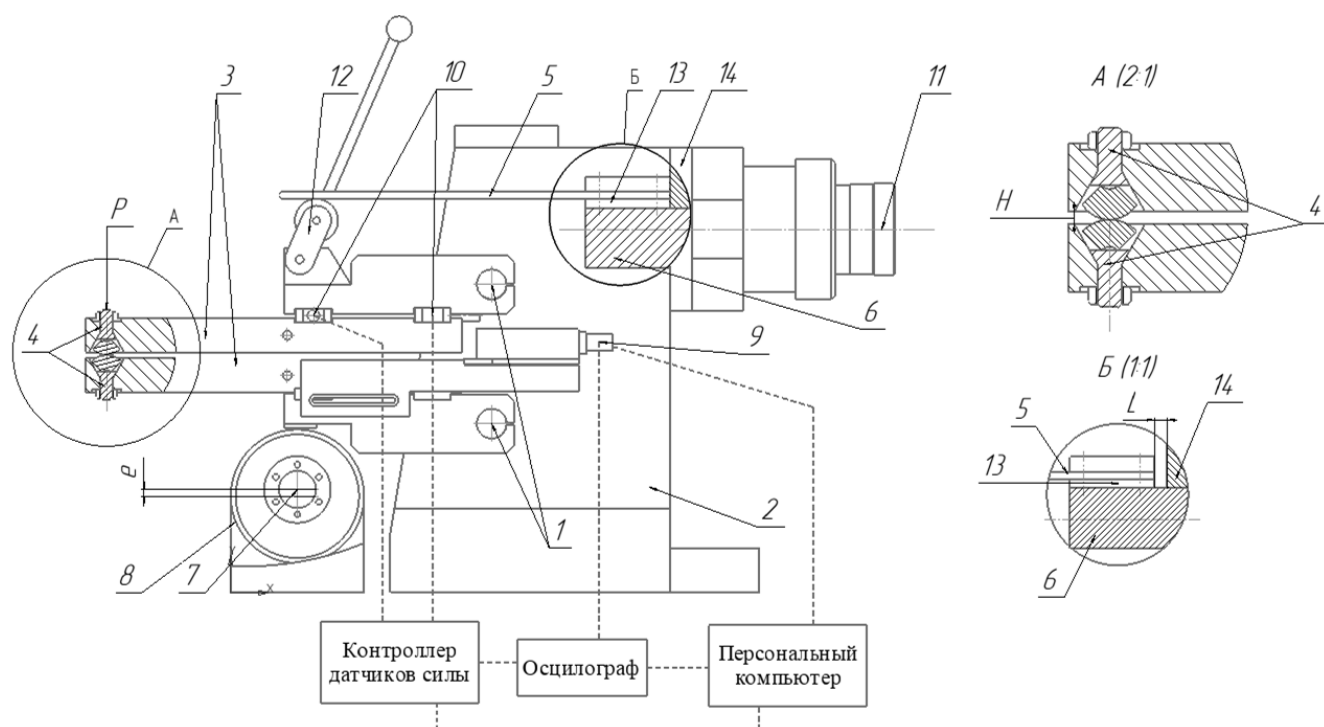
$$E_{di} = \sum_{i=1}^N \frac{\delta_{i+1} - \delta_i}{2} (F_{\text{тр}(i+1)} + F_{\text{тр}i}), \quad (10)$$

где $\delta_{i, i+1}$ – мгновенные значения реальных перемещений с учетом жесткости системы машины трения (k_s), $F_{i, i+1}$ – мгновенные значения силы трения, N – количество мгновенных измерений за цикл трения.

Расчет и запись значений трибологических параметров ведутся непрерывно до момента окончания эксперимента при достижении количества циклов- значения, задаваемых в начале эксперимента. Корректировка перемещения процесса фреттинг-изнашивания производится с помощью PID-регулятора

Машина трения 3308.

На рис. представлено схематическое изображение машины трения с системой регистрации параметров трения (рис.3.12.).



1 – оси рычагов; 2 – плиты корпуса установки; 3 – рычаги; 4 – цанги с образцами; 5 – плоская пружина; 6 – узел перемещения пружины; 7 – вал; 8 – внешняя обойма подшипника; 9 – лазерный датчик перемещения; 10 - датчики силы; 11 – винт перемещения привода пружины; 12 – рычаг; 13- проставка под пружиной; 14 – задняя стенка машины трения.

Рис. 3.12. Схема машины сухого знакопеременного трения

На осях 1, закрепленных между двумя стойками 2 корпуса установки, размещены два рычага 3, на конце которых устанавливаются цанговые зажимы 4 с испытуемыми образцами (рис. выноска А), пример которых представлен на рис. 3.13.

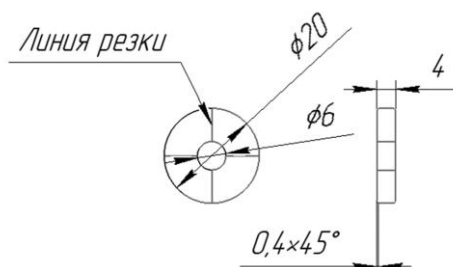


Рис. 3.13. Пример образца для трибологических испытаний.

Рычаг 12 передает усилие на образцы от плоской листовой пружины 5, установленной на узел перемещения 6. В результате между образцами, установленными в цанговые зажимы образуется контакт трения с нормальной нагрузкой P , которая может изменяться при изменении следующих параметров (рис.3.12):

- величина расстояния между рычагами H в зависимости от высоты установленных образцов в цангах 4 (рис. 3.12 выноска А);
- величина расстояния L между узлом перемещения пружины 6 и задней стенкой машины трения 14 (рис. 3.12 выноска Б);
- толщина проставки 13 между листовой пружинной 5 и узлом перемещения пружины 6 (рис. 3.12 выноска Б);

Возвратно-поступательное движение образцов друг относительно друга обеспечивается при вращении вала 7, закрепленном с эксцентриситетом «е», при этом внешняя обойма подшипников 8 находятся в постоянном контакте с нижним рычагом. Вал эксцентрикового механизма приводится в движение электродвигателем. Электродвигатель управляется частотным преобразователем путем установки на частотном преобразователе требуемой частоты вращения электродвигателя.

Определение величины возвратно-поступательного перемещения образцов, в зависимости от величины установленного эксцентриситета, производится лазерным триангуляционным датчиком РФ603HS ($D_{max} = \pm 2,5\text{мм}$, $\Delta = 5\text{мкм}$), установленном на нижнем рычаге 9. Измерение коэффициента трения производилось с помощью пары трехосных пьезоэлектрических датчиков силы Kistler 9027C (диапазон измерения от 0...4кН), закрепленных в верхнем рычаге машины трения 10 по схеме, рекомендованной производителем датчиков.

Для определения нормальной нагрузки, возникающей в месте установки образцов, использовался тензодатчик сжатия SLB-50 (диапазон измерения от 0...220Н) с контроллером DPM-3. Тарировочная кривая датчика представлена на рис. 3.14.

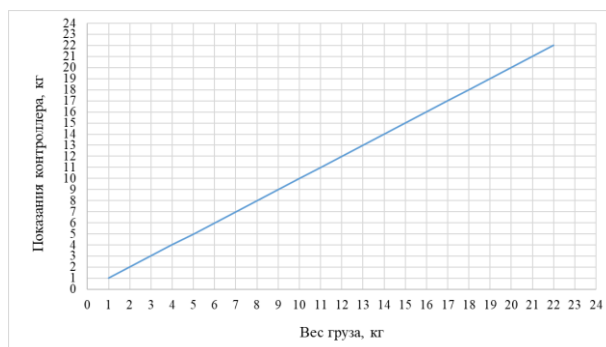


Рис. 3.14. Тарировочная кривая тензодатчика SLB-50.

Система регистрации параметров трения включает в себя следующие компоненты: два трехосных пьезоэлектрических датчиков силы Kistler 9027C ($F_{max}=4$ кН), закрепленных в верхнем рычаге машины трения по схеме, рекомендованной производителем датчиков; контроллер для датчиков силы Kistler LabAmp со сбором данных на персональный компьютер; лазерный триангуляционный датчик РФ603HS ($D_{max} = \pm 2,5$ мм, $\Delta=5$ мкм) с возможностью передачи данных на персональный компьютер; система регистрации и записи аналоговых сигналов с датчика силы и лазерного датчика на основе осциллографа АКПП 4115/ 1А с программным обеспечением EasyScore.

Методика расчета характеристик параметров трения и результатов износа образцов. Числовой массив, получаемый осциллографом с датчиков измерения, записывается на ПК и выглядит в виде трех столбцов: времени (с), силы (В) и перемещения (В). Регистрация значений, считываемых датчиками, происходит в вольтах (В), поэтому для расчета механических свойств системы эти значения переводились с помощью переводных коэффициентов в Н и мкм соответственно. Для пьезоэлектрического датчика силы этот коэффициент составлял $k_f = 800$ Н/В, а для оптического лазерного датчика – $k_d = 0,5$ В/мм.

Затем по преобразованным данным строится петля гистерезиса (график зависимости силы трения от перемещения), представленный на рис. 3.15.

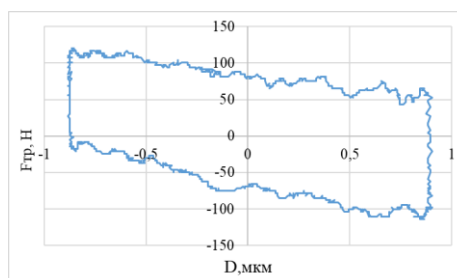


Рис. 3.15. Петля износа, построенная по данным полученных с датчиков

Определение скорости износа образцов, на этой машине трения, производилось в процессе испытания путем измерения ширины хорды по фотографии. Фотографировалось специальное приспособление, на котором установлено зеркало. Фотографии делаются в течении всего эксперимента через равные промежутки времени. Схема определения величины хорды Z представлена на рис. 3.16.

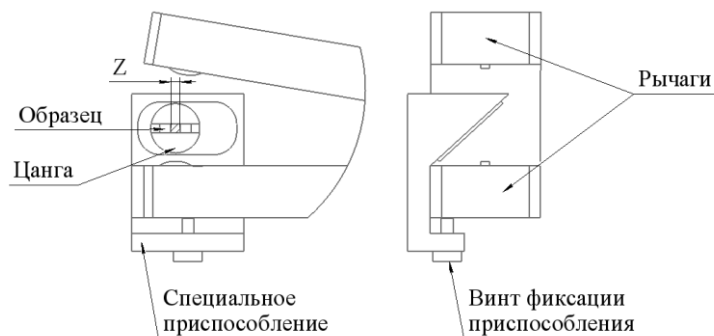


Рис. 3.16. Схема определения величины хорды

Обработка результатов проводилась по следующей методике. Результаты измерений x представляли собой вариационный ряд $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$, при этом из ряда исключались подозрительные результаты, имеющие грубые погрешности. Затем вычислялось среднее значение $\bar{x} = \frac{1}{N-Kn} \sum_1^{N-Kn} x_i$, где Kn – число подозрительных результатов.

Оценка средних квадратических отклонений результатов наблюдений проводилась согласно выражению: $S = \left[\frac{1}{n-1-Kn} \sum_{i=2}^{N-Kn} (x_i - \bar{x})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$, а результата измерения согласно выражению: $S_x = \frac{S}{(N-Kn)^{\frac{1}{2}}}$

Для оценки грубых погрешностей считалось, что результаты содержат грубую погрешность, если выполняется условие: $|x_i(x_n) - \bar{x}| \geq t_{0,95} S$, где $t_{0,95}$ квантиль распределения Стьюдента при доверительной вероятности = 0,95 и числе степеней свободы $N-Kn$. Если гипотеза о наличии грубых погрешностей не подтверждалась, результаты возвращались в вариационный ряд и пересчитывалось среднее значение, среднее квадратичное отклонение и результат измерений.

Доверительные границы погрешности результата измерений вычислялись как $\Delta = \pm t_{0,95} S_x$

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ФРЕТТИНГ-ИЗНАШИВАНИЯ ТСП, ПОЛУЧЕННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

4.1. Исследование фреттинг-изнашивания ТСП, осажденных в магнетронной распылительной системе (MPC).

В последнее время многие исследователи сосредоточили свое внимание на дальнейшем увеличении твердости покрытий из нитрида титана TiN за счет наноразмерного легирования, в результате чего были получены более значительные значения твердости и износостойкости [66]. На сама по себе твердость не гарантирует длительный срок службы или низкое трение в большинстве случаев скольжения. Поэтому значительное внимание было уделено тем композитным покрытиям, которые основаны на сочетании твердой и мягкой фаз [67]. Такие покрытия, например, типа MeN-X достаточно просто могут быть синтезированы, например, в магнетронных распылительных системах, где мягкий металл распыляется из одной мишени, а твердый нитрид переходного металла получается из другой реакционным распылением ее в среде смеси газов Ar+N₂.

Целью данного исследования является изучение поведения при фреттинге покрытий из нитрида титана TiN, легированных свинцом Pb в широком диапазоне условий сухого трения при фреттинге. Покрытия TiN давно и хорошо зарекомендовали себя в качестве высокоизносостойких покрытий, используемых при механической обработке, при защите от износа и коррозии различных элементов узлов трения ДЛА и ЭУ. Так в работе [68] показано, что технологический процесс и режимы нанесения пленки TiN успешно реализованы в MPC осаждением на торцевую поверхность опорного уплотнительного кольца турбонасосного агрегата (ТНА) ЖРД, обеспечив высокую степень уплотнения и низкий уровень (согласно техническим требованиям КБ «Энергомаш») утечки жидкого кислорода. В этой же работе была впервые показана возможность легирования твердой матрицы TiN мягкой фазой Pb, впоследствии закрепленная патентом на изобретение [69]. Это легирование свинцом Pb позволило значительно уменьшить износ покрытия TiN-Pb, сформированного реактивным распылением в MPC из мозаичной мишени [70], однако систематические исследования такого композиционного покрытия с прямым определением оптимального содержания Pb в покрытии проведены не были, что является одной из основных задач настоящей работы.

Проведенные предварительные поисковые исследования [71,72] позволили, как показано в работе [73], методом реакционного магнетронного распыления постоянного тока из двух отдельных мишеней Ti и Pb получить композиционные покрытия состава TiN-Pb на подложке из титанового сплава. Прямоугольные планарные магнетроны с размерами мишеней 273×112×10мм, выполненные из титана марки BT1-0 и свинца чистотой 99,5%, были вертикально

размещены в вакуумной камере на расстояниях мишень-подложка 100мм и мишень-ионный источник 160мм под углом 90° друг к другу и 45° к подложке (как это показано на рис. 4.1). Экраны, выполненные из стали 304, вертикальная часть которых составляла 55 мм, служили для защиты от переноса распыленных атомов с мишени на мишень магнетронов. Рабочие газы Ar и N_2 подавались в вакуумную камеру через протяженный ионный источник типа ДАС.

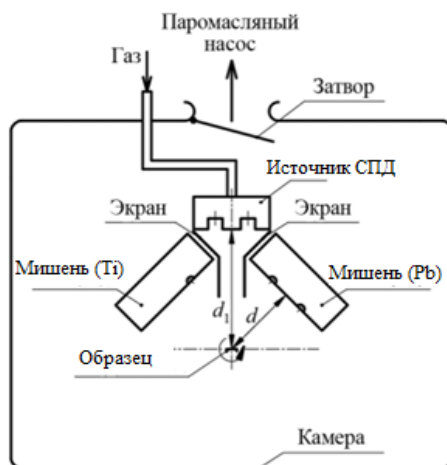


Рис.4.1. Схема установки МРС

Напыляемые образцы были выполнены размером $\varnothing 25 \times 3$ мм из титанового сплава ВТ6. Перед установкой в камере на вращающемся держателе образцы очищались в ультразвуковой ванне в бензине и изопропиловом спирте в течение 10 мин. Дополнительно, уже в камере, образцы очищались ионами Ar^+ с энергией $E \sim 1,0$ кэВ с использованием ионного источника при давлении аргона $5 \cdot 10^{-2}$ Па и средней плотности ионного тока $j = 2$ мА/см².

При получении вакуума в камере ее стенки и внутри-камерную оснастку очищали тлеющим разрядом. После очистки образцов ионный источник отключался, запускалось вращение держателя с образцом со скоростью 205 об/мин и проводилось напыление Ti подслоя при давлении аргона $1,2 \cdot 10^{-1}$ Па в течение 20 мин. При поддержании постоянного расхода подаваемого в камеру аргона на уровне 6,0 либо 8,5 см³/мин и меняя от опыта к опыту расход подаваемого в камеру азота, напыляли подслоя TiN в течение 10 мин и затем покрытие TiN—Pb в течение 720 мин при параметрах процесса, указанных в Таблице 13.

Таблица 13. Параметры процесса напыления и характеристик TiN-Pb покрытий

№	I_{Pb} , А	P_{Ar+N_2} , Па	Q_{Ar} , см ³ /мин	Q_{Ar2}/Q_{N_2}	h, мкм	Ti, %	Pb, %	HV _{0,05}	Фазовый состав	V_{TiN}/V_{Pb+PbO}	R_{hkl} (111)
1	0,2	0,73	6,1	0,6	3	25,9	16	246	PbO-PbO	0	-
2	0,1	0,73	6,07	0,61	2,5	36	4,8	464	PbO-PbO-TiN	0,56	2
3	0,1	0,54	6,01	0,82	1,9	34,1	5,1	557	PbO-PbO-TiN	0,7	2,6
4	0,1	0,63	8,48	1,17	2,7	29,6	7,1	446	PbO-PbO-TiN	0,3	2,9
5	0,1	0,31	8,56	1,36	1,9	37,8	6,2	597	PbO-PbO-TiN	0,52	1,5
6	0,1	0,26	8,65	2,08	3,3	40,4	5	590	PbO-PbO-TiN	0,55	1,5
7	0,1	0,22	8,65	3,53	4,4	38,5	1,6	594	PbO-PbO-TiN	3,6	6,1
8	0,1	0,19	8,65	4,30	5,2	27,2	0,5	489	TiN	>10	5,7

На образце №8 покрытие наносилось с ионным ассистированием при суммарном давлении Ar+N₂ равном 0,19Па, при этом оба магнетрона работали в режиме стабилизации тока I_{Ti} = 3,5 А и I_{Pb} = 0,1 или 0,2 А.

Исследование элементного состава полученных покрытий проводили на сканирующем электронном микроскопе EVO-40 («Carl Zeiss», Германия) с приставкой для энергодисперсионного анализа (EDS) INCA Oxford Instr. (Великобритания).

Толщину покрытий измеряли интерферометрическим методом по уступу, сформированному на образце-свидетеле, с помощью бесконтактного профилометра MicroXAM-100 3D (США).

Микротвердость HV определяли на микротвердомере Micromet 5101 фирмы «Buehler» (США) по ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007 при нагрузке 0,49 Н. Трибологические испытания образцов осуществляли на машине трения 1401 в условиях фреттинга. В качестве модельного контакта использовали схему сфера/плоскость. При этом плоскостью служили образцы с покрытиями (Таблица 13), а сферой — шар Ø12,6 мм, изготовленный из стали ШХ-15. Условия испытания пары трения были следующими: нормальная нагрузка F_n = 1 Н, схема контактного взаимодействия сфера/плоскость, относительное перемещение тел D = 60 мкм, частота f = 20 Гц, число циклов трения n = 5 · 10⁴, окружающая среда – атмосфера лаборатории.

Осмотр пятен повреждения и измерение профилей износа покрытий проводили с помощью конфокального микроскопа Olympus LEXT OLS 5000 (Япония).

Рентгенофазовый анализ выполняли на рентгеновском дифрактометре ДРОН-4 в фильтрованном CuKα-излучении с длиной волны λ_{ср} = 1,54178 Å. Исследование структуры, фазового состава и свойств магнетронных TiN—Pb-покрытий проводили в зависимости от отношения расходов аргона и азота (Q_{Ar}/Q_{N2}).

Анализ дифрактограм покрытий, как показано в [73], позволяет установить, что фазовый состав покрытий определяется током на Pb мишени, а также отношением потоков аргона и азота. При токе I_{Pb} = 0,2А покрытие характеризуется наличием Pb и PbO в смешанной аморфно-кристаллической форме, а при I_{Pb} = 0,1А в состав покрытия входит TiN, доля которого практически не меняется при соотношении Q_{Ar2}/ Q_{N2} = 1÷2 и резко увеличивается при его повышении до 3,6, а при его значении 4,3 содержащие свинец фазы полностью отсутствуют.

Значения и отношения потоков аргона и азота в интервале от 1 до 2 соответствуют максимальной величине микротвердости и износостойкости покрытий, как это показано на рис. 4.2. Снижение износостойкости при высоких значениях Q_{Ar2}/ Q_{N2}= 3,5 ÷4,3 сопровождается, согласно [73], резким усилением текстурного компонента (111) фазы TiN, что свидетельствует о наличии корреляции износостойкости с текстурой покрытия.

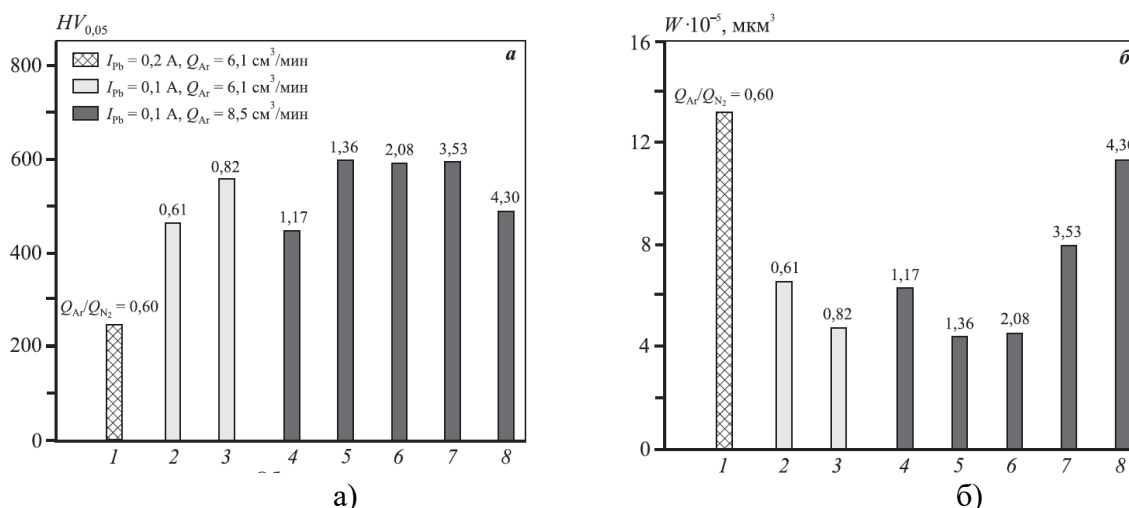


Рис.4.2. Зависимость микротвердости (а) и объемного износа (б) магнетронных TiN–Pb-покрытий от параметров процесса напыления (номера образца в таблице).

Следует отметить, что толщина покрытий варьируется в широких пределах от 2 до 5 мкм (Таблица 13) и влияет на измерение значений микротвердости. Кроме того, для некоторых режимов осаждения обнаружено существенное увеличение периода решетки (с) подложки из сплава ВТ6. Также увеличение наблюдается обычно при образовании твердого раствора внедрения на основе гексагональной решетки $\alpha\text{-Ti}$ и свидетельствует о том, что наряду с формированием многофазного покрытия происходит процесс азотирования, который может приводить к существенному росту микротвердости такого покрытия и подповерхностного слоя подложки.

Таким образом, в этой части исследования было установлено влияние условий магнетронного осаждения на формирование фазового состава и текстуры, а также на микротвердость и износостойкость композитных TiN-Pb покрытий.

На следующем этапе работы были проведены трибологические исследования покрытий системы TiN-Pb с целью определения оптимального значения свинца Pb в покрытии с целью обеспечения минимального объемного износа.

В этих исследованиях частота относительного перемещения образцов на этом этапе исследований f была принята равной 20 Гц, в большинстве экспериментов образцы совершали $N_{ц} = 5 \cdot 10^4$ циклов возвратно-поступательного перемещений (что составляет примерно 40 минут непрерывной работы), при значениях перемещений $D=60$ мкм и нормальной силы в контакте $F_n=1$ Н, что соответствует давлению в контакте ~ 400 МПа. Все эксперименты происходили в лабораторных условиях: температура окружающей среды – 23°C, влажность – 30%.

В ходе экспериментов и по их окончании фиксировались значения коэффициентов трения и характер изменения петель износа для различных значений циклов $N_{ц}$ перемещения. Проводилось также измерение объема износа и визуальная оценка фреттинг-повреждений с

помощью оптического конфокального микроскопа Olympus LEXT OLS 5000. Технические возможности этого микроскопа позволили не только определять глубину пятен фреттинг- износа и величины объёмного износа, но и оценивать величины объёма перенесённого материала с образца на контртело.

Исследованные пары трения: ШХ15 (контртело) с покрытиями TiN (образец из сплава 95X18) и TiN-Pb с различным содержанием свинца от 2 до 22 % ат. Pb представлены в Таблице 14.

Таблица 14. Исследованные пары трения

Номер пары трения	1	2	3	4	5	6
Покрытие	TiN-Pb (Pb 2% ат.)	TiN-Pb (Pb 6% ат.)	TiN-Pb (Pb 13% ат.)	TiN-Pb (Pb 16% ат.)	TiN-Pb (Pb 22% ат.)	TiN
Контртело	ШХ 15	ШХ 15	ШХ 15	ШХ 15	ШХ 15	ШХ 15

Диаграммы сравнения на базе в $N_{ц} = 5 \cdot 10^4$ циклов величин объёмного износа W_{v-} , мкм^3 образцов с покрытиями и объёма перенесённого материала контртела W_{v+} , мкм^3 на поверхность покрытия, таких же диаграмм сравнения объёмного износа контртела из ШХ15 и объёма, перенесённого на поверхность контртела материала TiN-Pb и зависимость объёмного износа W_{v-} , мкм^3 от % ат. содержания Pb в составе композиционного покрытия показаны на рис.4.3-4.5, соответственно.

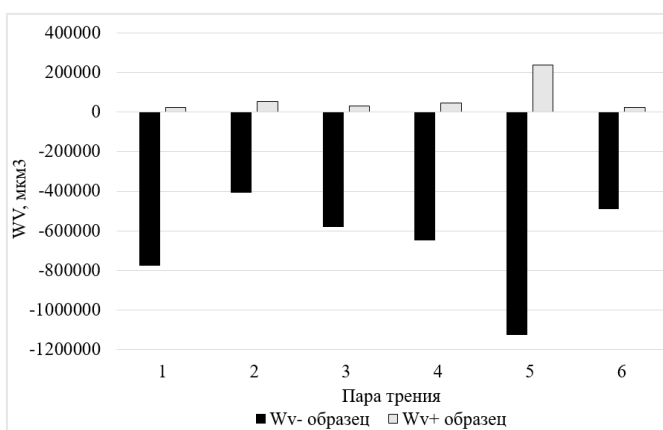


Рис.4.3. Диаграмма сравнения износа (переноса) на плоских образцах с покрытиями.

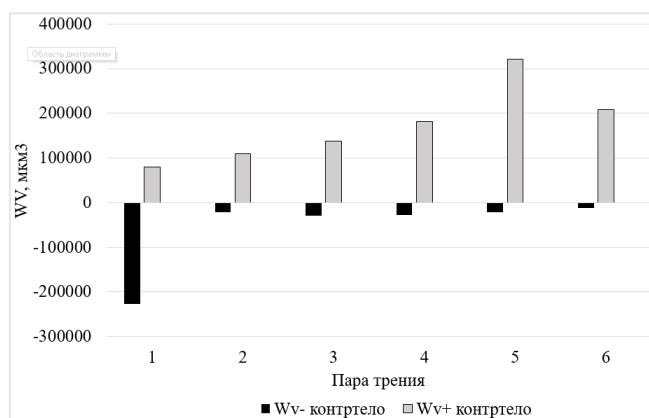


Рис.4.4. Диаграмма сравнения износа (переноса) на контртеле из ШХ15.

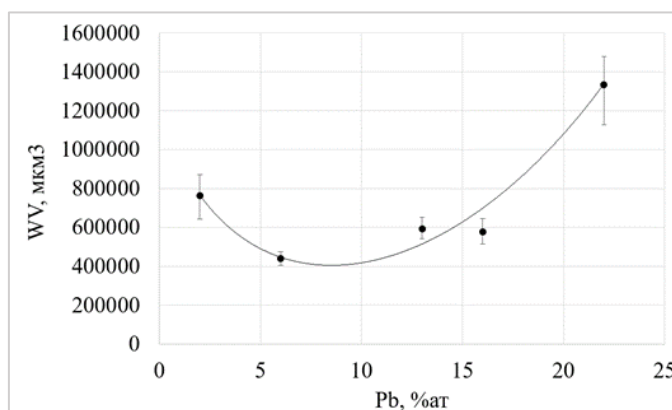


Рис.4.5. Зависимость объёмного износа W_{V-} , мкм³ от % ат содержания Pb в покрытии.

Анализ этих диаграмм и зависимости, представленных на рис. 4.3. – 4.5 позволил установить, что для композиционного покрытия TiN-Pb найдено оптимальное значение свинца Pb в составе покрытия, лежащее в диапазоне 5-10 % ат. Дальнейшее увеличение свинца в покрытии не только не приводит к улучшению его износостойкости, и, следовательно, фреттингостойкости, в заданных условиях тестирования, но и значительно повышая его износ, снижает фреттингостойкость покрытия, ограничивая его возможности по многократному использованию, характерному для современных ЖРД [74]. Одновременно, можно отметить наличие в данных условиях тестирования постоянного переноса композиционного покрытия TiN-Pb на стальную поверхность контртела, что способствует пониженным значениям коэффициента трения по сравнению с парами трения 95X18-ШХ15 и TiN-ШХ15. Сравнение зависимостей коэффициента трения μ для исследуемых пар в зависимости от числа циклов фреттинга, в котором представлены значения только для покрытия с величиной свинца в покрытии равном 6% ат., показаны на рис. 4.6.

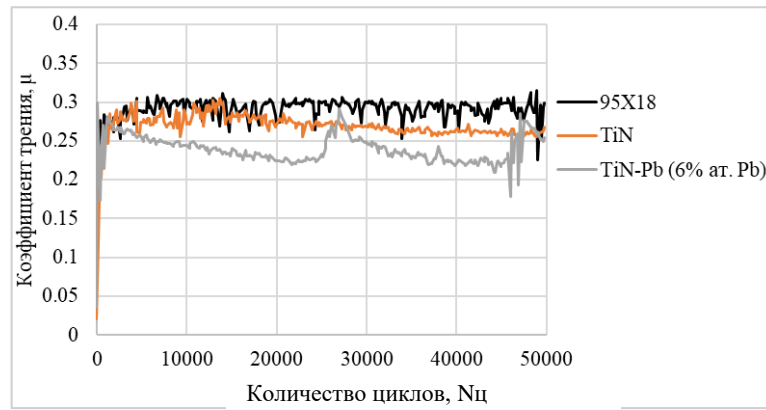


Рис. 4.6. Зависимости сравнения коэффициентов трения для трёх пар трения:

а) 95X18-ШХ15, б) TiN-ШХ15 и в) TiN-Pb (6% ат. Pb)-ШХ15

Технические возможности используемой машины трения позволили не только провести измерения коэффициентов трения для различных покрытий, но и определять энергию диссипации E_d , Дж, затрачиваемой на разрушение покрытия за каждый цикл, оценить ресурс каждого покрытия при известной толщине.

Энергию диссипации рассчитывали путём прямого измерения работы, затрачиваемой на разрушение покрытий, при одновременном измерении силы трения ($F_{тр}$, Н) и перемещения (D , мкм). На рис.4.7 представлены петли гистерезиса $F_{тр}$ - D , полученные при возвратно-поступательном фреттинг-изнашивании за один цикл трения в конце испытания при общем числе циклов $5 \cdot 10^4$.

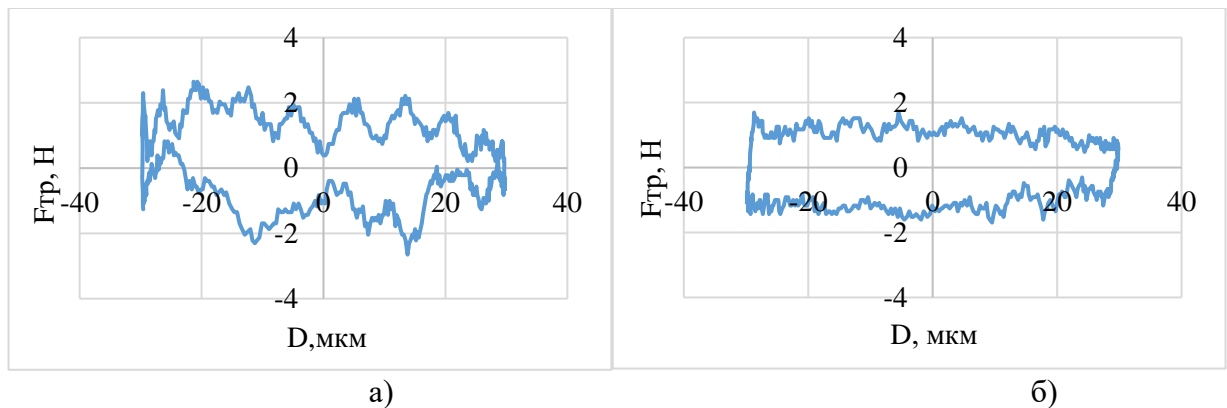


Рис.4.7. Петли гистерезиса, полученные при изнашивании образцов с покрытиями TiN(а) и TiN-Pb (6% ат.) (б)

Суммируя эту энергию за каждый цикл ($E_d = \sum E_{di}$) и относя эту сумму к объёмному износу, можно рассчитать энергетический коэффициент износа α ($\text{мм}^3/\text{Дж}$): $\alpha = W_v/E_d$. Измеренные и рассчитанные значения объёмного износа, энергии диссипации и энергетические коэффициенты объёмного износа приведены в Таблице 15.

Таблица 15. Трибологические показатели покрытий

Образец	$Wv \cdot 10^{-4}$, мм ³	Ed, Дж	$a \cdot 10^{-4}$, мм ³ /Дж
2	4,06262	6,08	0,66
6	4,89156	6,49	0,75

Анализ полученных значений показал, что при одних и тех же режимах фреттинга объёмный износ TiN-Pb (6% ат.) покрытий по сравнению с TiN покрытием несколько снижается (в 1,2 раза), снижаются при этом коэффициент трения μ . По петлям гистерезиса сила-смещение $F_{тр-D}$, зарегистрированным при тестировании TiN покрытия, наблюдается заметная волнообразная с резкими гранями эволюция, свидетельствующая о наличии заедания («прилипания») в определенных точках контакта (рис.4.7 а). Однако на петлях, полученных на TiN-Pb (6% ат.Pb), не отмечены такие характеристики заедания (рис.4.7 б). Поэтому предполагается, что низкий коэффициент трения μ скольжения при оптимальном значении свинца Pb в покрытии обусловлен своего рода граничной смазкой свинца, препятствующей заеданию контактирующих поверхностей.

Из анализа полученных на машине трения результатов в ходе испытаний на фреттинг-изнашивание для композиционного покрытия TiN-Pb было определено оптимальное значение свинца Pb в составе покрытия, лежащее в диапазоне 5-10 % ат при котором объёмный износ был минимальным. На основании результатов трибологических испытаний и анализа петель гистерезиса $F_{тр-D}$, полученных при возвратно-поступательном изнашивании образцов, было установлено, что износ этого оптимального покрытия в 1,2 раза меньше, чем у покрытия TiN в заданных условиях тестирования.

Построение тангенциальной силы Q (D) от смещения позволяет построить петлю фреттинг - изнашивания, которая позволяет получить информацию по явлению схватывания - скольжения. Область, занимаемая петлей (рис. 4.8) указывает на то, что в процессе фреттинга отводится энергия за счет нагрева, изменения структуры материала, химических реакций и поведения третьего тела [75].

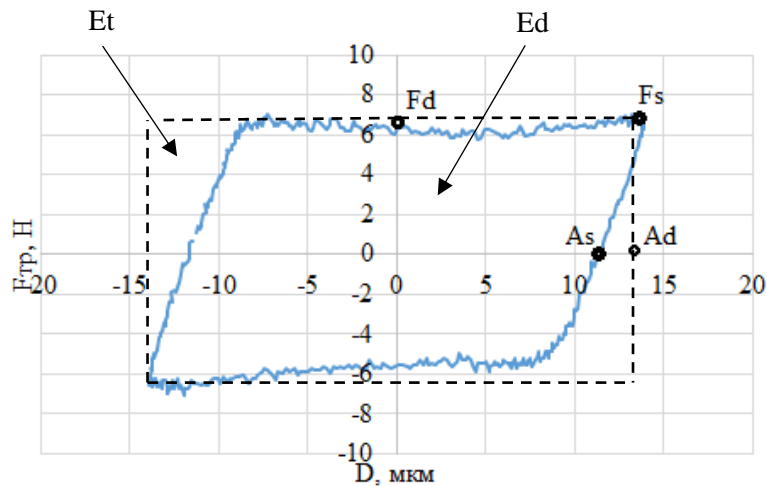


Рис.4.8. Петля фреттинг-гистерезиса и её основные параметры.

Как уже отмечалось выше, фреттинг-гистерезисные петли для режима полного схватывания представляют собой закрытую петлю полного (прямая линия), что указывает на очень незначительный износ, поскольку в этом режиме теряется мало энергии. Для режима полного скольжения характерна трапецевидная петля, поскольку в этом случае теряется (рассеивается) большое количество энергии, что в этом случае часто связано с изнашиванием. Эллиптическая петля гистерезиса характеризует так называемый режим частичного скольжения, наиболее тяжелой для контактной зоны и приводящей в итоге к возникновению и развитию трещин.

В работе [76] было введено понятие коэффициента энергии (energy ratio – ER), представляющее отношение рассеянной энергии (энергии диссипации, энергии трения), т.е. площадь внутри петли фреттинга, к общей энергии, задаваемой машиной трения, в нашем случае вибратором.

Энергетический коэффициент записывается как $ER=Ed/Et$, получаемый при тестировании, а его зависимость от количества циклов рассматривается для того, чтобы наблюдать при проведении эксперимента за эволюцией режимов фреттинг-изнашивания по времени через задаваемое количество циклов.

На рис.4.9 представлена такая зависимость изменения коэффициента ER от количества циклов, построенная для системы покрытия TiN-Pb (при 16%ат. Pb) для нагрузки в 10Н и задаваемым смещением $D=30\text{мкм}$.

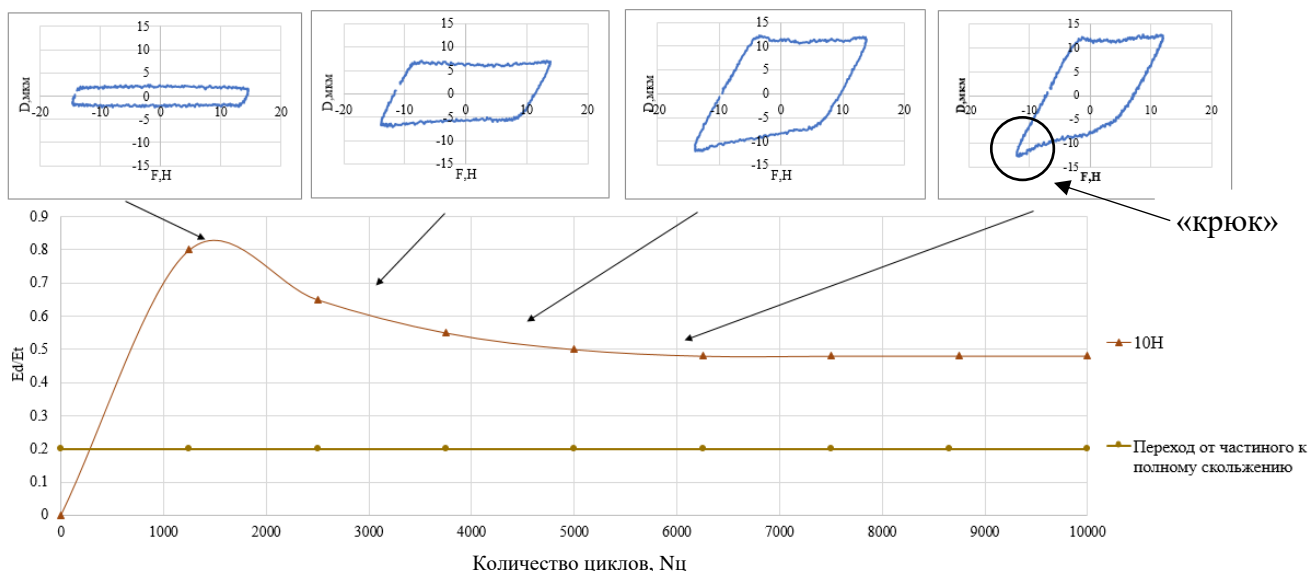


Рис. 4.9. Изменение энергетического коэффициента покрытия TiN-Pb (при 16%ат. Pb) по числу циклов (до 10^4).

Анализ полученных результатов показал, что в ходе всего эксперимента наблюдается режим полного скольжения и коэффициент энергетического соотношения во время эксперимента остается выше 0,2. Но в ходе испытаний происходит изменение формы петли гистерезиса, демонстрирующее увеличение силы трения, уменьшение амплитуды скольжения и образование так называемого «крюка». Можно предположить, что данное изменение формы петли гистерезиса в зависимости от количества циклов является следствием изменения условий контакта, вызванные взаимодействием рубцов и впадин в контакте [77, 78].

Анализ поверхностей пятен износа подтвердил изменение условий контакта в начале (рис.4.10) и в конце испытаний (рис.4.11). Так на рис.4.10 твердое смазочное покрытие практически не изношено. На рис.4.11 наблюдается обратная картина. Покрытие изношено до подложки, при этом в пятне контакта наблюдаются выступы и впадины.

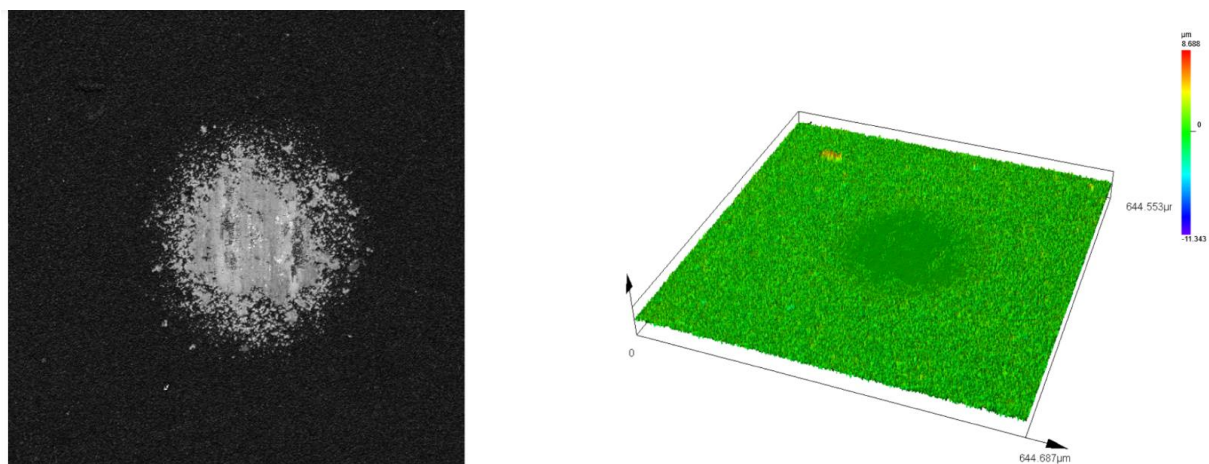


Рис.4.10. Изображение поверхности образца с пятнами износа, полученное в оптическом микроскопе и измеренный рельеф в начале испытаний

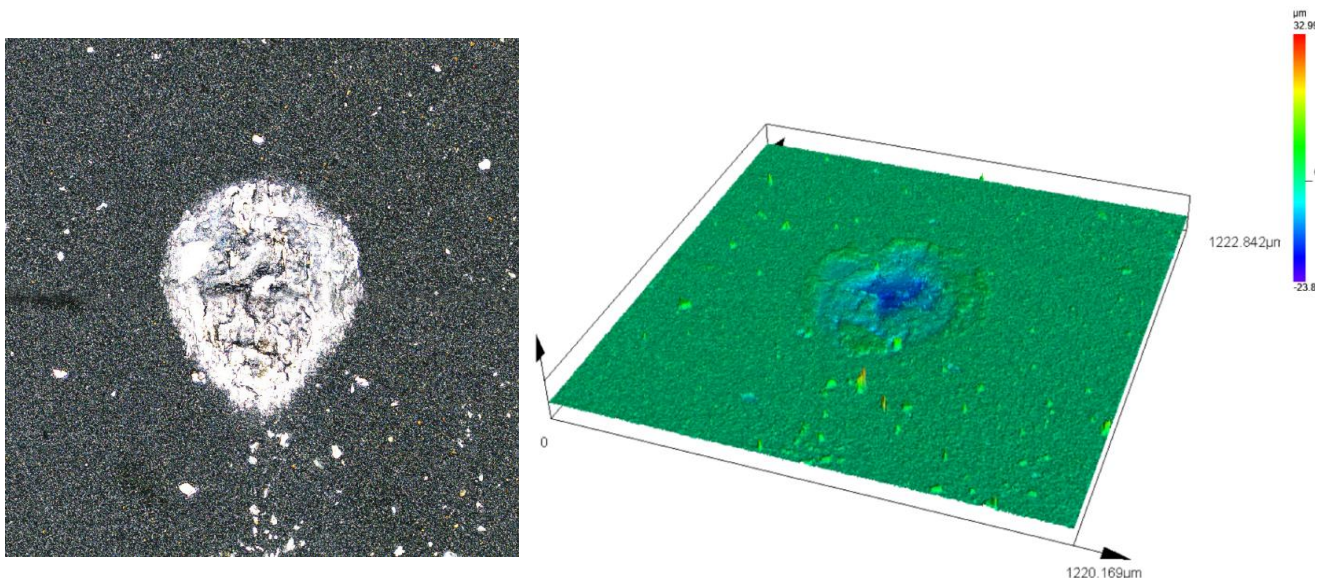


Рис.4.11. Изображение поверхности образца с пятнами износа, полученное в оптическом микроскопе и измеренный рельеф в конце испытаний

Для покрытия TiN-Pb (16% ат.) была построена полная карта фреттинга в широком диапазоне изменения параметров нагружения: перемещение $D= 5- 60$ мкм, нормальная нагрузка в контакте $F_n= 1-13$ Н, частота – 20Гц, количество циклов $N_{ц}= 10^4$. В качестве контртела использовался шарик из стали ШХ-15 диаметром 12,5 мм.

Эта карта фреттинга, построенная по результатам анализа петель фреттинг-гистерезиса, представлена на рис.4.12. Соответствующие режимам фреттинга повреждения покрытия показаны на фотографиях изношенных поверхностей (рис.4.13-4.15), полученных в сканирующем электронном микроскопе (СЭМ).

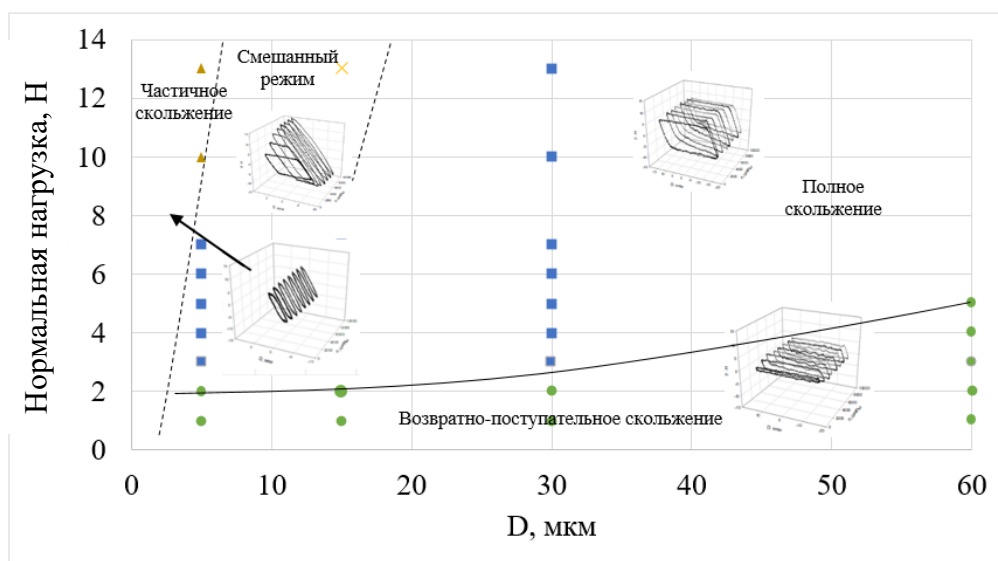


Рис.4.12. Карта фреттинга условий работы ТСП системы TiN-Pb.

Механизмы разрушения материалов, полученные из анализа петель гистерезиса, были определены по результатам изучения морфологии пятен износа после испытаний. Так на рис.4.13 приведено изображение пятна износа, полученного в режиме 5 мкм, 13 Н (частичное скольжение). Как видно, пятно износа представляет собой небольшое неравномерное повреждение с характерными размерами ~ 100 мкм вдоль оси перемещения и ~250 мкм поперек. При большем увеличении (рис. 4.13б) наблюдаются трещины на поверхности покрытия длиной до 15 мкм, которые расположены строго перпендикулярно к направлению трения тел. Таким образом, механизм разрушения поверхности покрытия соответствует режиму частичного проскальзывания – усталостному разрушению, которое возникает в результате действия знакопеременной силы трения в контакте в совокупности с наличием перехода между зонами скольжения и упругого взаимодействия тел.

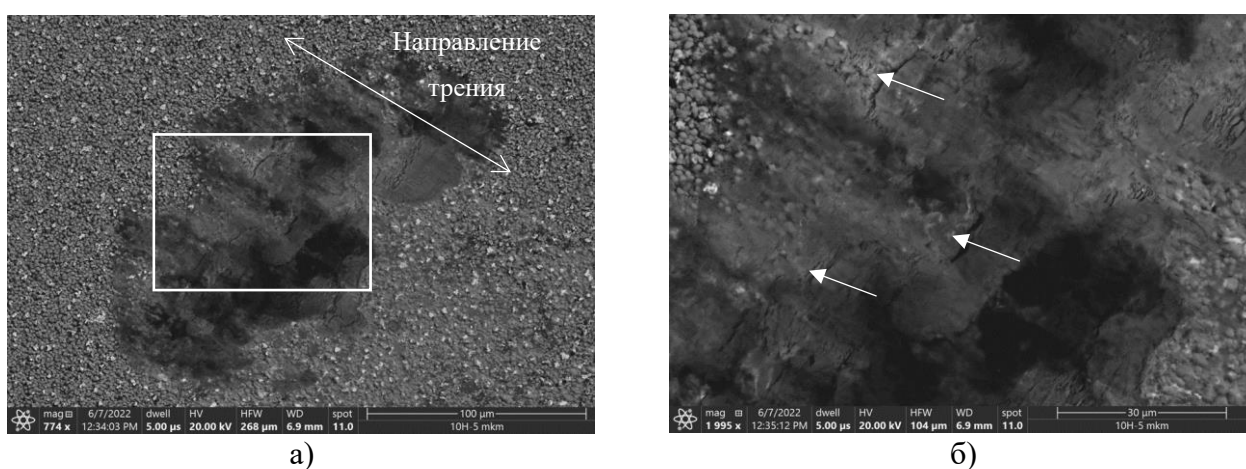


Рис.4.13. Изображения повреждения покрытия TiN/Pb, полученным при трении с ШХ-15 в режимах 5 мкм, 13 Н, полученные на электронном микроскопе при увеличениях 774х (а) и 1995х (б)

В смешанном режиме фреттинга (рис. 4.14) процесс усталостного разрушения, при той же базе испытаний, значительно усугубляется - формируется ярко выраженная сеть трещин на всей площади пятна повреждения на поверхности покрытия. Процесс дальнейшего разрушения покрытия может привести к отслаиванию крупных агломератов покрытия в процессе трения и при дальнейшем взаимодействии контртела с защищаемой подложкой, а также, при определенных условиях, к переходу трещин с покрытия в поверхностный слой подложки.



Рис. 4.14. Изображения повреждения покрытия TiN/Pb, полученным при трении с ШХ-15 в режимах 15 мкм, 10 Н, полученные на электронном микроскопе.

В режиме полного скольжения фреттинга механизм разрушения полностью изменяет свой характер и в области контакта трения начинают превалировать процессы абразивного взаимодействия (рис.4.15). Кроме того, благодаря добавлению в состав композиционного покрытия пластичного компонента в виде свинца, наблюдается характерный сдвиговый рельеф покрытия вдоль направления движения тел.

Также надо отметить, что уровень энергии диссипации (рис.4.12) в режиме полного скольжения наиболее высокий, что косвенно подтверждает увеличение скорости изнашивания. Элементный анализ пятна износа показывает появление в центре пятна износа зон с повышенным содержанием титана (рис.4.15б), что говорит о начале процесса полного изнашивания покрытия до подложки.

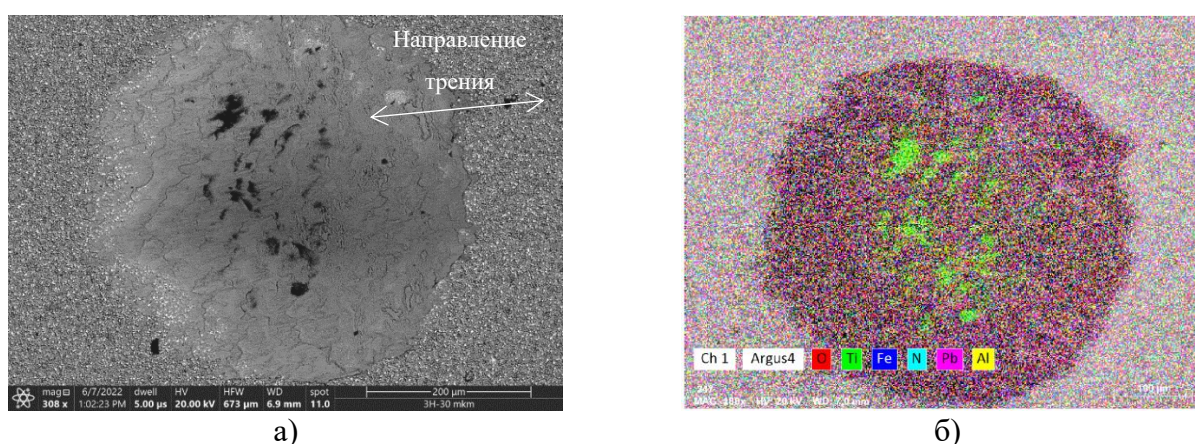


Рис.4.15. Изображения повреждения покрытия TiN/Pb, полученное при трении с ШХ-15 в режиме 30 мкм, 3 Н (а) и карта элементов (б)

При переходе от режима полного скольжения (нагрузка 3 Н, перемещение 30 мкм) в режим возвратно-поступательного скольжения (нагрузка 1 Н, перемещение 30 мкм) энергия диссипация падает более чем в 3 раза, что отражается и в резком снижении коэффициента трения с 0,25 до 0,05 (рис.4.16).

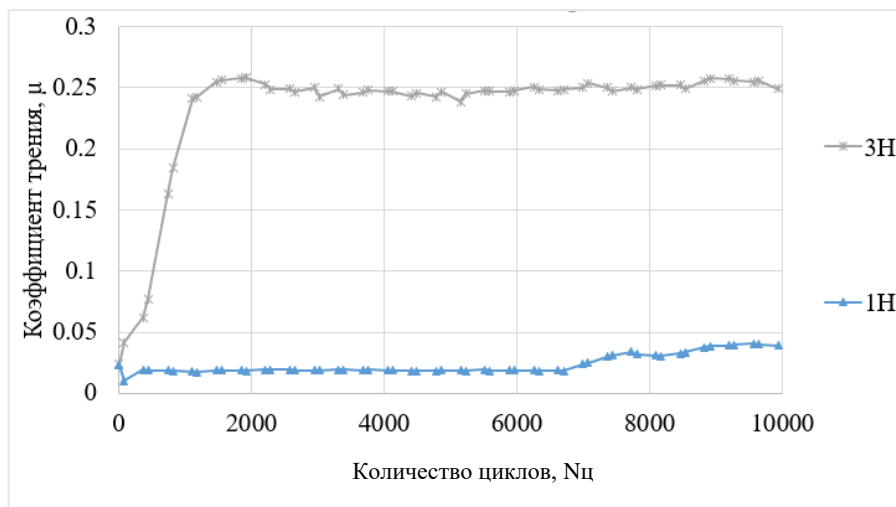


Рис.4.16. Зависимость коэффициента трения от количества циклов.

При анализе пятен повреждений для режима возвратно-поступательного и полного скольжения была обнаружена (рис.4.17) взаимосвязь между шириной петли гистерезиса и глубиной пятна повреждения: скорость изнашивания покрытия достаточно сильно зависит от прикладываемой нормальной нагрузки, что с одной стороны говорит о необходимости повышения несущей способности покрытия, а с другой о хорошем влиянии добавки свинца для снижения коэффициента трения.

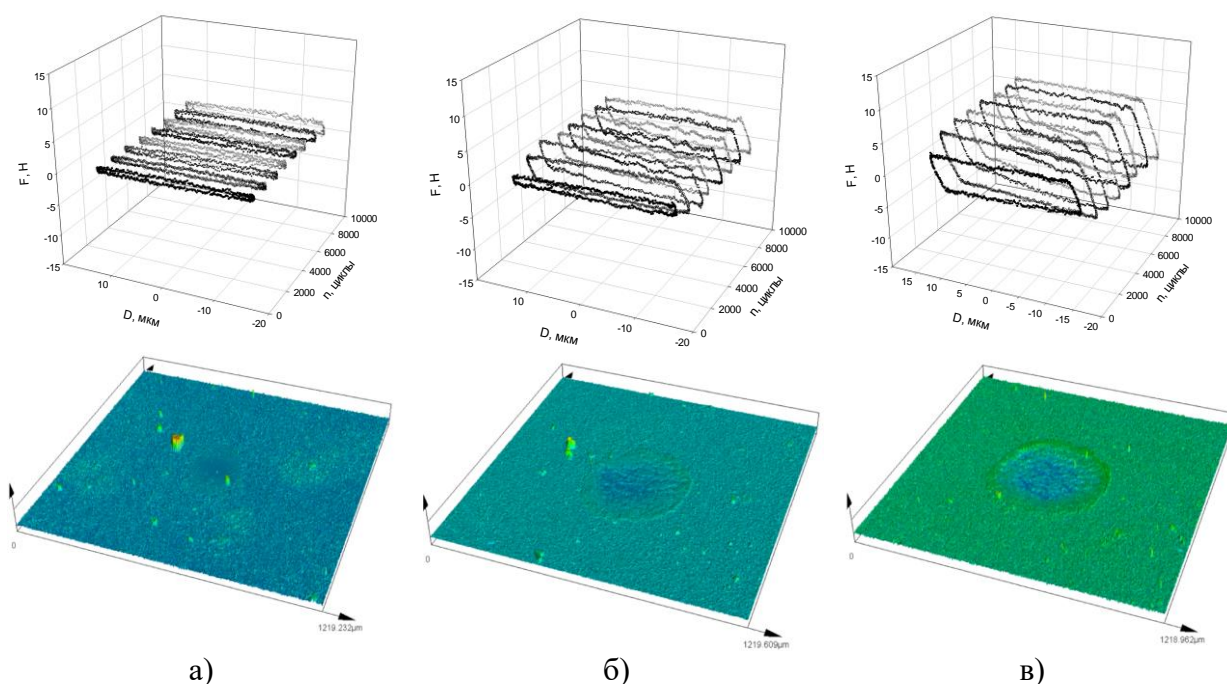
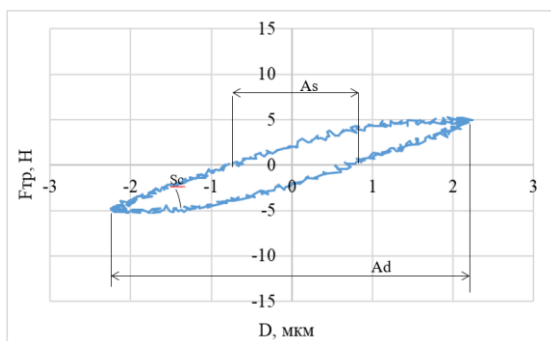


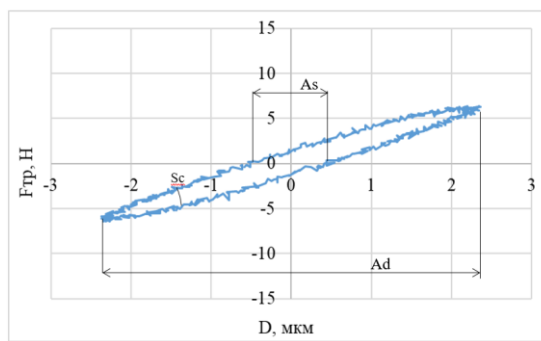
Рис.4.17. Изменение формы петли гистерезиса и вида пятна износа для режимов: 30 мкм
 – 1 Н(а), 2 Н(б) и 3 Н(в).

На рис.4.18 показано изменение индекса скольжения в начале и в конце испытания для каждого режима. Вычисление индекса скольжения производилось по формуле $\delta = Ad \cdot Sc / P$, вывод которой рассмотрен в разделе 2.2.



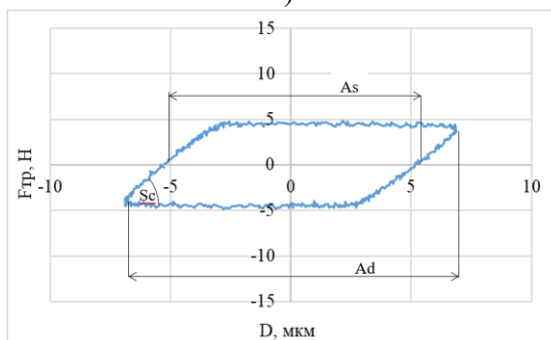
$\delta = 0,78$

а)



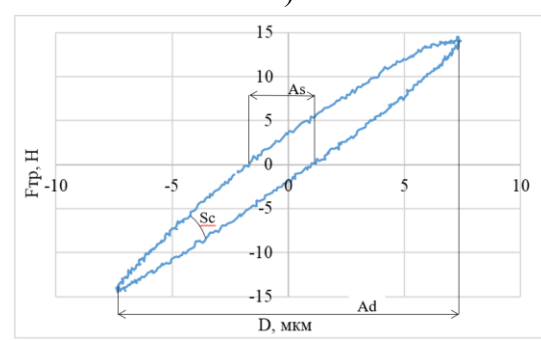
$\delta = 0,65$

б)



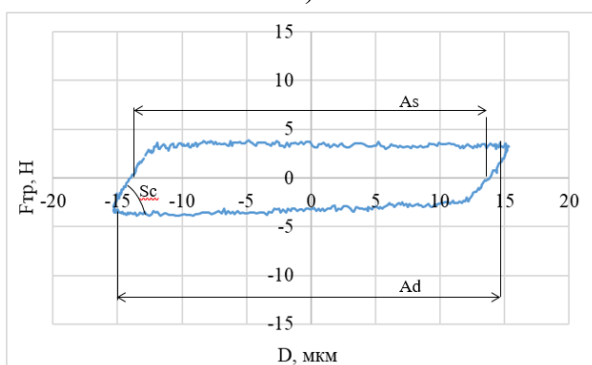
$\delta = 2,3$

в)



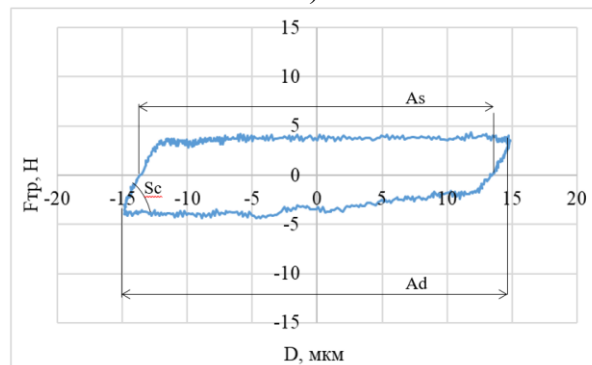
$\delta = 0,63$

г)



$\delta = 5,6$

д)



$\delta = 5,8$

е)

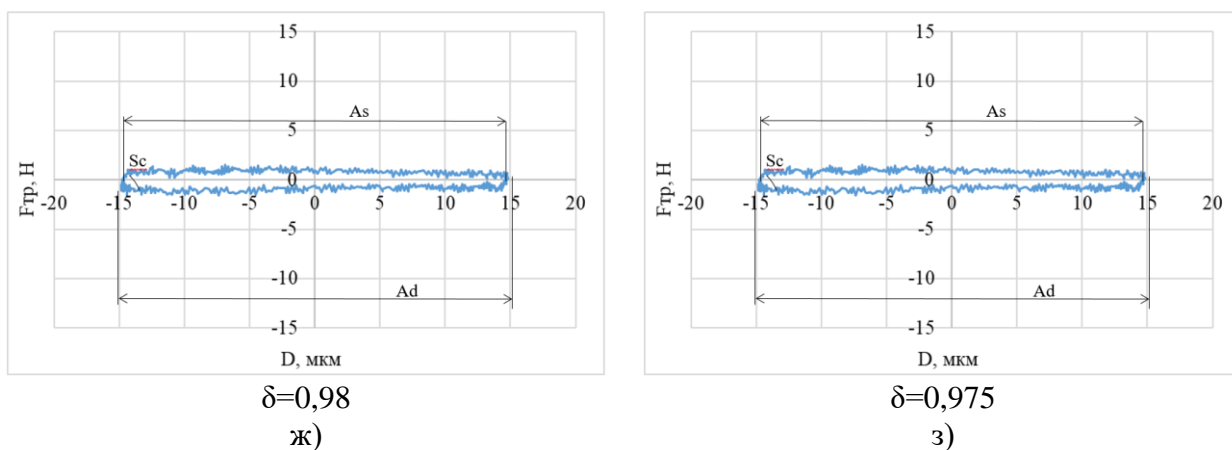


Рис.4.18. Изменение индекса скольжения для режима: а,б- частичного скольжения; в,г- смешанного режима; д,е – полное скольжение; ж,з – возвратно-поступательное скольжение.

Анализируя петли, представленные на рис.4.18, можно установить, что для режима частичного скольжения, полного скольжения и возвратно-поступательного скольжения индекс скольжения практически не меняется на протяжении всего эксперимента, в то время как для смешанного режима (рис.4.18 в, г) индекс скольжения во время эксперимента уменьшился в 3,5 раза, что говорит нам о том, что произошло изменение режима фреттинга с полного скольжения на частичное скольжение.

Таким образом, режим возвратно-поступательного скольжения, как и режим частичного проскальзывания, для твердого смазочного покрытия системы TiNPb возникает в узких диапазонах нагрузок и перемещений, соответственно. В режиме полного скольжения наблюдается приемлемый для ТСП коэффициент трения $\sim 0,25$, но при этом скорость изнашивания покрытия достаточно высока, что к концу испытания приводит к разрушению покрытия в локальных местах до подложки.

Смешанный режим также возникает в узком диапазоне нагрузок и имеет катастрофические последствия для покрытия – образуется сеть трещин, которая может привести к его отслаиванию.

Таким образом, в результате детального исследования фреттингостойкости покрытия TiN+Pb при различных содержаниях свинца Pb в его составе можно сделать следующие выводы:

- впервые экспериментально получена зависимость объемного износа W_v , мкм³ от % содержания свинца Pb в покрытии TiN+Pb;
- подтверждено непосредственным измерением оптимальное значение % содержания Pb равное 5-10% ат, предсказанное в работе [69];
- показано, что при одних и тех же режимах фреттинга объемный износ TiN-Pb (6% ат. Pb) покрытие по сравнению с TiN снижается 1,2 раза, снижается при этом и

коэффициент трения μ ; присутствие свинца в покрытии значительно снижает волнообразную с резкими гранями эволюцию трения, свидетельствующую о наличии точечного заедания («прилипания»), что эффективно показано на петлях фреттинг-гистерезиса $F_{тр}-D$;

- впервые для покрытия TiN-Pb (16% ат. Pb) построена зависимость изменения энергетического коэффициента (ER) по числу циклов (до 10^4), позволяющую в режиме «online» следить за эволюцией режимов фреттинга;
- анализ впервые построенной для покрытия TiN+Pb (16% ат. Pb) полной карты фреттинга позволил определить все режимы фреттинга и подтвердить их исследованием изнашивания на электронном микроскопе;
- индекс скольжения позволил определить все режимы взаимодействия тел при фреттинге, от частичного скольжения до режима возвратно-поступательного скольжения.

4.2. Зависимости характеристик фреттинг-изнашивания ТСП, полученных методами CAD и PACVD

Одним из ключевых направлений использования твердых смазочных покрытий (ТСП), в том числе и высокотемпературных, является их применение в составе узлов трения современных и перспективных изделий авиационной и ракетно-космической техники. Наиболее ярким примером их использования служат разработки узлов трения двигателей летательных аппаратов (ДЛА) и энергетических установок (ЭУ) [79].

Так, как было отмечено выше, в газотурбинных двигателях (ГТД) много ответственных деталей, постоянно или временно работающих в условиях сухого трения, к которым относятся: лабиринтные и щеточные уплотнения, газодинамические подшипники, валы-втулки поворотных лопаток, направляющих аппаратов, подвижные элементы сопла и др. Для защиты от износа этих пар трения, часть из которых работает при повышенных нагрузках и в условиях фреттинг-изнашивания, необходимо применить ТСП, основные требования к которым сводятся к обеспечению низких коэффициентов трения и низкой шероховатости поверхности с достижением высоких значений твердости и износостойкости.

Современный подход к решению проблемы повышения надежности и ресурса высоконагруженных и высокотемпературных элементов газотурбинных двигателей (ГТД) и энергоустановок на их основе, является использование при их изготовлении специальной керамики, одной из разновидностей которой является сиапон, получивший свое название по первым буквам элементов, входящих в его состав Si-Al-O-N [80]. Он представляет собой твердый

раствор на основе нитрида кремния, полученный путем замещения атомов кремния алюминием и атомов азота кислородом. Сиапон обладает стабильностью при высоких температурах (1500-1800 °С), высокими показателями коррозионной, жаро- и износостойкости, значительной твердостью и прочностью, стойкостью к агрессивным средам.

Кроме того, благодаря своим уникальным свойствам сиапон представляет большой интерес для использования его в качестве инструментальной керамики и для изготовления высокопроизводительного режущего инструмента, используемого при механической обработке жаропрочных сплавов на никелевой основе [81]. Эти отечественные и зарубежные жаропрочные сплавы типа Inconel являются основными материалами, из которых изготавливаются горячие элементы современных ГТД, и их механическая обработка требует специальных инструментов высокой стойкости. Для обеспечения правильного и длительного функционирования такой режущий инструмент также должен быть защищен специальными ТСП, повышающими его стойкость [82].

В качестве недостатков сиапона следует отметить в основном те, которые связаны со сложностью технологии его спекания, а также пониженная теплопроводность сиапоновых изделий, существенно затрудняющая их механическую обработку. В работе [83] отмечается, что современные тенденции развития металлообрабатывающего производства связаны с отказом от смазочно-охлаждающих жидкостей и переходом к «сухой» обработке, когда традиционная смазка на жидкой основе заменяется на термостойкие высокотемпературные смазывающие ТСП. Последние представляют собой композитные, многокомпонентные покрытия со сложным химическим составом, которые обеспечивают оптимальную микротвердость, термическую стабильность и требуемые трибологические свойства [84].

Ухудшение эксплуатационных свойств инструмента, постепенная потеря работоспособности его режущих кромок жестко связаны с условиями эксплуатации при воздействии высокой температуры и высоких контактных давлений, работой в агрессивных средах, что при наличии вибраций и циклических нагрузок позволяет в первом приближении рассматривать эти условия при определенных режимах обработки близкими к условиям фреттинг-изнашивания. Поэтому основная цель настоящего раздела работы заключается в испытаниях на износостойкость образцов, выполненных из сиапона с многослойными композиционными ТСП на машине трения в условиях фреттинга и возвратно-поступательного скольжения.

Для проведения исследований и получения характеристик по фреттингостойкости поверхностей керамических образцов с различными покрытиями были получены заготовки базового материала SiAlON в виде дисков диаметром 20 мм и толщиной 9 мм. Эти заготовки формировались методом искрового плазменного высокотемпературного спекания порошковых

композиций в графитовых формах на установке производства FCT Systeme GmbH (Effelder-Rauenstein), Германия. Технология получения заготовок детально описана в [84]. Порошковые композиции представляли собой смесь α -SiAlON, β -SiAlON с добавками нитрида титана TiN при следующем соотношении компонентов: 80 мас.% смеси (α -SiAlON, 90 мас.%, β -SiAlON, 10 мас.%) + 20 мас.% TiN.

На плоские поверхности образцов на установке PACVD наносились три состава покрытий:

1. TiN/(Ti,Al)N - нанослойная структура типа «сэндвич», первый слой (подслой) которой был из TiN толщиной 0.3-0.4 мкм и наносился для повышения прочности адгезии покрытия к подложке. В сравнении с традиционными однослойными покрытиями выбранное нанослойное покрытие имело лучшее соотношение «микротвердость – модуль упругости», что особенно важно с учетом циклического характера нагрузок в процессе возвратно-поступательного и фреттинг-изнашивания [85-87].
2. (Cr,Al,Si)N - нанокompозитная структура. При испарении и осаждении различных элементов (Cr,Al и Si) не происходило их полного смешивания, а образовывалось двухфазное покрытие, в котором нанокристаллические зерна TiCrN были внедрены в аморфную матрицу SiN. Такая нанокompозитная структура значительно улучшает физико-механические характеристики покрытия, которое обладает высокой износостойкостью [88-89].
3. (Cr,Al,Si)N/a-C:H:Si – внешний алмазоподобный слой этого покрытия состоял из аморфного гидрогенизированного углерода. Подслой (Cr,Al,Si)N толщиной 1.7-1.8 мкм формировался с целью снижения внутренних напряжений в a-C:H-пленке [90]. Пленки a-C:H:Si, благодаря наличию кремния продемонстрировали значительно лучшую эластичность, приемлемые остаточные напряжения и термостойкость [91]. Было также установлено, что наилучшие показатели по термостойкости имеют a-C:H с содержанием Si 3% [92]. Содержание Si в пленке регулировалось скоростью потока тетраметилсилана Si(CH₃)₄ в газовой смеси.

Общая толщина каждого из вариантов покрытий, которые были нанесены на керамику на основе SiAlON, составляла 3.7-3.8 мкм. Детальные условия и режимы осаждения покрытий приведены в работах [90,91].

Измерение нанотвердости поверхности проводились в соответствии с рекомендациями [93,94]. По схеме наноиндентирования алмазным индентором Берковича на нанотвердомере CSEM были определены твердость по шкале Мартенса (НМ) и модуль упругости нитридных и a-C:H:Si покрытий. Глубина вдавливания во время испытаний поддерживалась на уровне 100 нм.

Время нагрузки-разгрузки составило 50 с, приложенная нагрузка 1,0 мН. Количественное значение нанотвердости рассчитывалось с помощью сертифицированного программного обеспечения CSEM [95].

Топографию поверхности керамических образцов с различными покрытиями анализировали на профилометре BrukerDektakht, в системе которого предусмотрена электромеханическая схема измерения с использованием перемещения щупа с алмазным наконечником по поверхности образца. Требуемая область сканирования, скорость движения и сила нажатия стилуса программировались, а специализированное программное обеспечение позволило сформировать рельефные изображения исследуемых керамических образцов в формате 3D [95].

Оценка трибологических свойств покрытий (коэффициент трения и износостойкость) при фреттинге проводилась на машине трения 1401, схема которой показана на рис. 3.7, в возвратно-поступательном режиме. В качестве модельного контакта использовалась схема сфера/плоскость, при этом сферой служил шарик из ШХ-15 ($\varnothing 12,6$ мм), а плоскостью – образец из SiAlON диаметром 20 мм и толщиной 9 мм с различными покрытиями. Условия испытаний представлены в Таблице 16 [96].

Таблица 16. Условия испытаний образцов

Смещение D, мкм	Частота f, Гц	Нагрузка F _n , Н	Количество циклов, Nц	Окружающая среда
15	100	10	$5 \cdot 10^3$	Атмосфера лаборатории

Жесткость системы машины трения с приспособлением для крепления образцов оценивалась прямым измерением и составила $k_c = 31$ МН/м. Методика этих исследований подробно изложена в [64]. Все эксперименты происходили в лабораторных условиях: температура окружающей среды – 23°C, влажность – 37±5%.

В ходе экспериментов и по их окончании фиксировались значения коэффициентов трения. Проводилось также измерение объема износа и визуальная оценка износных повреждений с помощью оптического конфокального микроскопа Olympus LEXT OLS 5000. Технические возможности которого позволили определять глубину пятен фреттинг-износа и величины объемного износа.

Результаты измерений твердости по шкале Мартенса представлены в таблице 17. Этот параметр описывает упругопластическое поведение поверхностного слоя образца керамики с покрытиями.

Таблица 17. Механические свойства различных покрытий, нанесенные на керамические образцы

Материал	Композиция покрытия	Твердость, НМ (ГПа)	Модуль упругости, Е (ГПа)	Индекс пластичности и Н/Е
SiAlON + TiN	TiN/(Ti,Al)N	38±2	376±8	0,101
SiAlON + TiN	(Cr,Al,Si)N	29±1	321±6	0,09
SiAlON + TiN	(Cr,Al,Si)N/a-C:H:Si	33±2	287±10	0,114

Как показывают полученные экспериментальные данные, максимальная твердость (38 ГПа) наблюдается у образца с покрытием TiN/(Ti,Al)N. Покрытия (Cr,Al,Si)N/aC:H:Si обеспечивают несколько более низкое значение НМ (33 ГПа). Минимальное значение (29 ГПа) было получено для покрытий (Cr,Al,Si)N. Из этого можно сделать вывод, что все исследованные покрытия повышают начальную твердость керамического материала SiAlON + TiN по сравнению с твердостью спеченных образцов, которая составляет 16 ГПа.

Анализ кривых наноиндентирования различных покрытий позволил определить не только их твердость, но и модуль упругости. Также был рассчитан индекс пластичности Н/Е, что позволяет косвенно оценить способность поверхностного слоя керамики сопротивляться деформации. Как видно из представленных данных, наилучшее сочетание свойств (максимальный показатель пластичности) имеет керамический образец с покрытием (Cr,Al,Si)N/a-C:H:Si.

Влияние полученных покрытий на качество поверхности керамики на основе SiAlON показано на рис. 4.18. Качество поверхности керамики во многих случаях определяет стойкость к эксплуатационным нагрузкам [87]. Видно, что на поверхности образца без покрытия имеются различные абразивные царапины, расположенные хаотично под разными углами друг к другу. Кроме того, как было показано в исследованиях [84,86]. СЭМ-анализ выявляет значительное количество кратеров на поверхности керамики, оставшихся от зёрен, удаленных в процессе алмазного шлифования. Упомянутые особенности являются технологическими дефектами, присущими большинству даже самых современных процессов шлифования. Основная проблема заключается в том, что технологические дефекты служат концентраторами напряжений и повышают риск возникновения эксплуатационных дефектов, приводящих к хрупкому разрушению. Результаты, представленные на рис.4.19, демонстрируют, что влияние покрытий неоднозначно. Установлено, что нанесение покрытия (Cr,Al,Si)N не оказывает существенного влияния на микрорельеф поверхности керамических образцов, покрытие TiN/(Ti,Al)N заметно увеличивает исходную шероховатость поверхности керамики, а покрытия (Cr,Al,Si)N/aC:H:Si, заполняя царапины на поверхности керамических образцов, «маскируют» технологические дефекты.

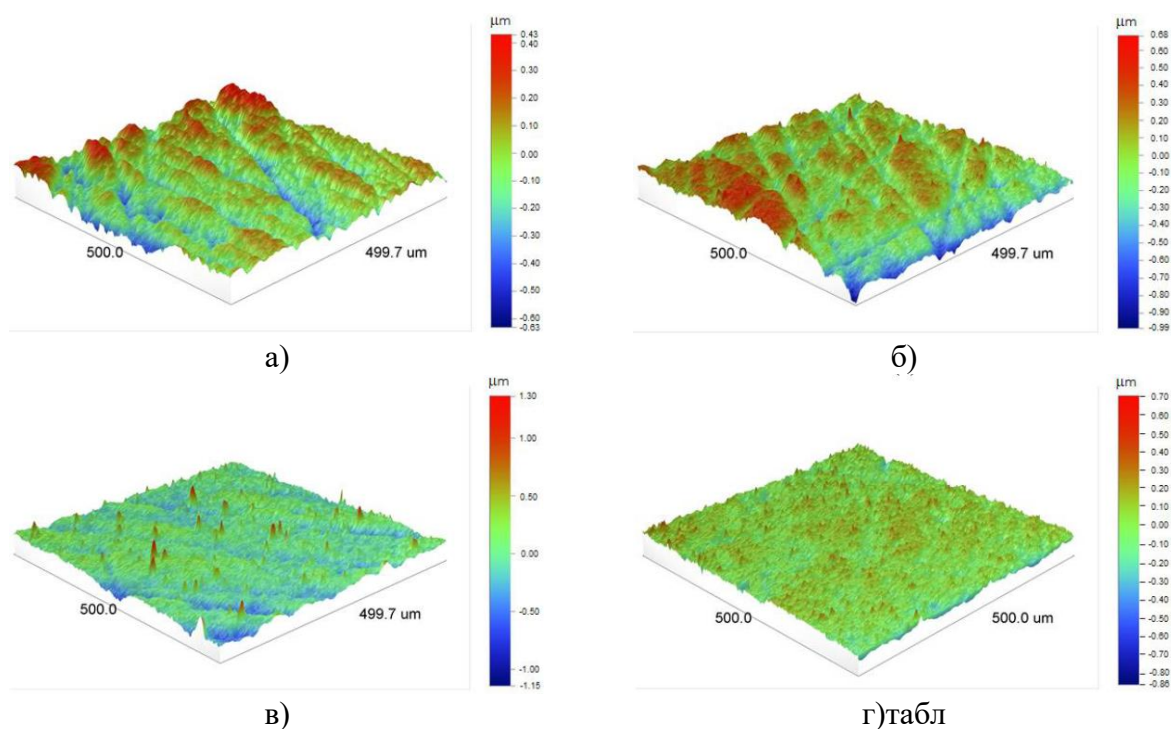


Рис.4.19. 3D-изображения микрорельефа поверхности образцов керамики на основе SiAlON: а – без покрытия; б – с покрытием (Cr,Al,Si)N; в – с покрытием TiN/(Ti,Al)N; г – с покрытием (Cr,Al,Si)N/a-C:H:Si.

Определение фреттингостойкости покрытий проводилось при параметрах, представленных в Таблице 16. Типы испытуемых покрытий с величинами объёмного износа, измеряемого в конце испытаний, диаграмма сравнения объёмных износов и зависимости изменения коэффициентов трения по количеству циклов фреттинга, представлены в Таблице 18 и на рис. 4.20-4.22.

Таблица 18. Типы покрытий на керамических образцах

№ образцов	№1	№2	№3	№4	№5	№6
Покрытие	(CrAlSi)N /aC:H	(Cr,Al,Si)N/ aC:H:Si	(Cr,Al,Si)N/ aC:H:Si	(Cr,Al,Si)N/ aC:H:Si	(Cr,Al,Si)N/ aC:H:Si	(Cr,Al,Si)N/ aC:H:Si
% Si в покрытии	-	0,8%	3%	5%	7%	10%
Износ, Wv мкм ³	5000	8567	10935	20587	20500	21000

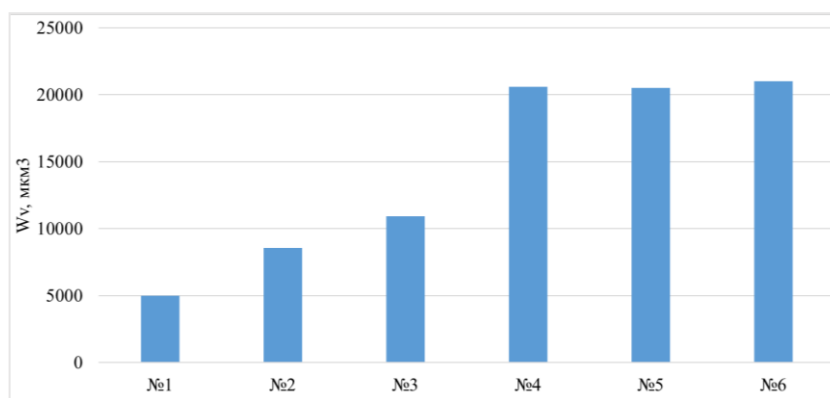


Рис.4.20. Диаграмма сравнения объёмного износа покрытий

Анализ полученных результатов показал, что легирование кремнием алмазоподобной углеродной плёнки путем ввода различного содержания тетраметилсилана $\text{Si}(\text{CH}_3)_4$ в состав смеси газов при реализации процесса PACVD, уменьшает износостойкость всех сформированных покрытий на основе $(\text{CrAlSi})\text{N} + \alpha\text{C}:\text{H}:\text{Si}$. Из диаграммы сравнения на рис. 4.19 видно, что после повышения процентного содержания Si больше чем на 3%, объёмный износ покрытий резко увеличивается и практически не реагирует на увеличивающееся содержание кремния в покрытии, оставаясь на прежнем высоком уровне. Объяснение этому явлению можно обнаружить из анализа пятен износа, представленных на рис. 4.20.

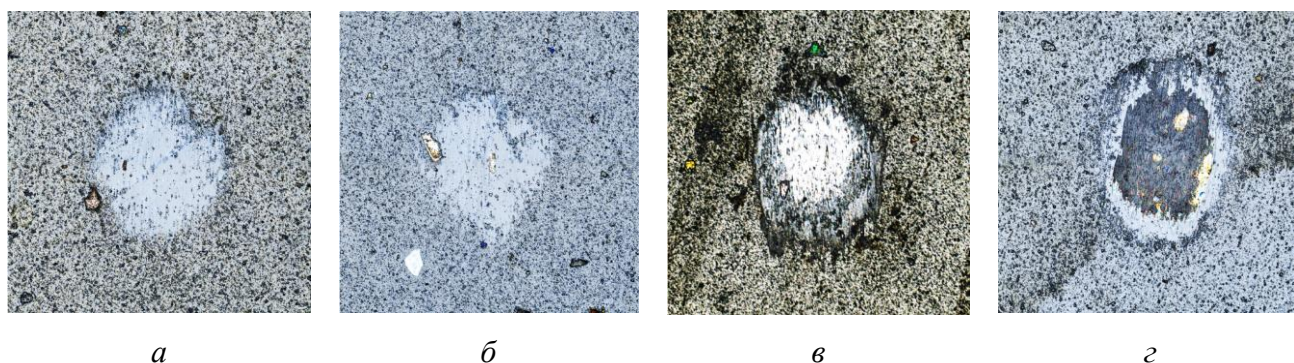


Рис.4.21. Фотографии пятен износа на поверхности образцов:

а – №1; б – №2; в – №3; г – №4

Из анализа этих пятен следует, что на образце с 3% содержанием кремния покрытие ещё работает, а при увеличении его содержания до 5% наступает «пробой» покрытия и начинает дополнительно изнашиваться подложка сialона, присутствие которого и определяет дальнейшее поведение объёмного износа, оставаясь на примерно одинаковом уровне, практически не зависящим от содержания кремния в покрытии, как это следует из диаграммы на рис. 4.21.

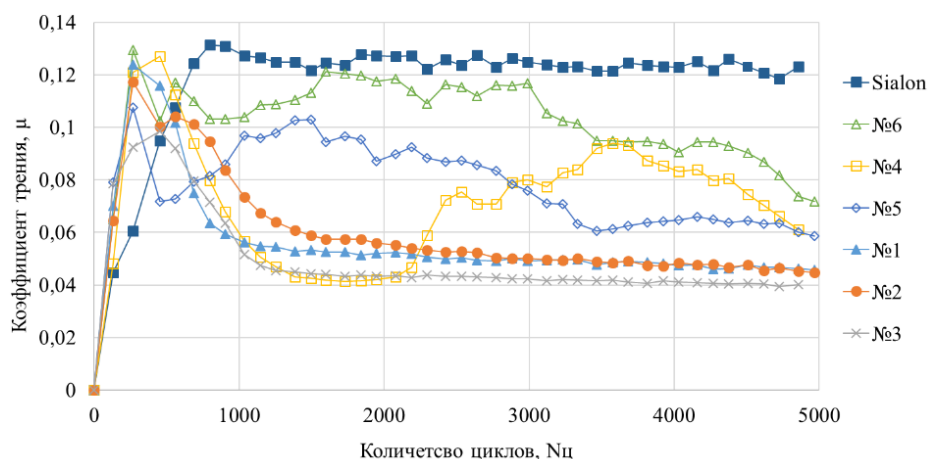


Рис.4.22. Зависимости коэффициентов трения покрытий от числа циклов фреттинга

Поведение коэффициентов трения μ в зависимости от количества циклов Nц для всех сформированных покрытий позволяет установить (рис. 4.22), что:

- присутствие кремния в покрытии с содержанием до 3% не влияет на поведение коэффициента трения, и при этом не ухудшает полученные наименьшие значения $\mu=0,04-0,045$;
- дальнейшее увеличение присутствия кремния в покрытиях приводит к резкому изменению в характере зависимостей коэффициентов трения, они становятся резкими, неустойчивыми со значительным увеличением и колебаниями значений μ , и при 10% содержании кремния в покрытии значения μ выходят на уровень сialона без покрытия, где $\mu=0,12$;
- поведение коэффициентов трения в диапазоне $0,04 \leq \mu \leq 0,12$ объясняется наличием в контакте трения, так называемого «третьего тела», представляющего собой скопление частиц износа (дебризов), количество которых постепенно удаляются из зоны контакта, что сказывается на поведении коэффициентов трения;
- характерно поведение коэффициента трения покрытия с 5% содержанием кремния: в начале это поведение не отличается от поведения образцов №1-3, но при $\sim 2 \cdot 10^3$ числе циклов наступает «пробой» покрытия и резко меняется поведение μ , увеличиваясь до значения 0,09.

Таким образом проведенные исследования многослойных композиционных ТСП на сialоне показали, что использование сialона для нужд авиационной промышленности может успешно идти по двум направлениям: с одной стороны для работы в составе узлов трения с покрытиями, обеспечивающими снижение коэффициентов трения при работе как в условиях действия нормальных температур, так и в высокотемпературных условиях, обеспечивая

повышение ресурса и надёжности этих узлов; и с другой стороны для использования сиалона с покрытиями в качестве инструментальной керамики в процессах механической обработки жаропрочных сплавов типа Inconel, обеспечивая высокую износостойкость применяемых инструментов.

С помощью полученных результатов наноиdentирования сформированных покрытий и анализа кривых наноиdentирования были определены не только их твердость, но и модуль упругости. Установлено, что нанотвёрдость многослойных покрытий, внешний слой которых представляет собой алмазоподобную пленку a-C:H, легированную кремнием (3 мас.%), обладает относительно высокой твёрдостью с наилучшим рассчитанным индексом пластичности H/E, что позволяет косвенно оценить наиболее высокую из всех исследованных покрытий способность поверхностного слоя керамики с указанным покрытием сопротивляться деформации. Как видно из представленных данных, наилучшее сочетание свойств (максимальный показатель пластичности) имеет керамический образец с покрытием (Cr,Al,Si)N/a-C:H:Si.

Важным результатом исследований является полученная при анализе топографии поверхности керамических образцов с различными покрытиями информация о влиянии покрытий на микрорельеф рабочей поверхности образцов, предварительно подвергшихся шлифованию. Установлено, что нанесение покрытия (Cr,Al,Si)N не оказывает существенного влияния на микрорельеф поверхности керамических образцов, покрытие TiN/(Ti,Al)N заметно увеличивает исходную шероховатость поверхности керамики, а покрытия (Cr,Al,Si)N/aC:H:Si, заполняя царапины на поверхности керамических образцов, «маскируют» технологические дефекты, неизбежные для всех современных процессов шлифования. Этот результат способствует повышению эксплуатационных характеристик рабочих поверхностей деталей пар трения.

Впервые проведенные исследования фреттингостойкости (Cr,Al,Si)N/aC:H:Si с различным содержанием кремния Si позволили установить, что содержание Si в объеме 3 мас.% является оптимальным не только точки зрения повышенной термостойкости покрытия, как следует из работы [87], но с точки зрения достижения высоких трибологических характеристик. Измерения объёмного износа и анализ вида пятен износа показали, что после повышения процентного содержания Si больше чем 3% объёмный износ покрытий резко увеличивается и практически не реагирует на увеличивающееся содержание кремния в покрытии, оставаясь на прежнем высоком уровне. Пятна износа не только продемонстрировали характерный «пробой» покрытия после превышения 3% порога в содержании кремния, но и подтвердили полученный результат.

Полученные зависимости коэффициента трения по числу циклов фреттинга также показали, что присутствие кремния в составе (Cr,Al,Si)N/aC:H:Si покрытия, улучшая отмеченные

выше эксплуатационные характеристики покрытий, не ухудшают коэффициенты трения. А после традиционной приработки держат их на уровне $\mu=0,04-0,045$ до окончания испытаний $\sim 5 \cdot 10^3$ циклов. Анализ этих зависимостей позволил также объяснить их поведение в диапазоне коэффициентов трения $0,04 \leq \mu \leq 0,12$ наличием, так называемого, «третьего тела», представляющего собой скопление частиц износа (дебризов), количество которых постепенно удаляется из зоны фреттинга, что сказывается на поведении коэффициентов трения. Отмечаются и такие трибологические особенности поведения исследуемых покрытий, как при повышении кремния в покрытии до 10% коэффициент трения достигает значения коэффициента трения силалона без покрытия, а для покрытия с 5% содержанием кремния отмечается, что если в начале испытаний его поведение не отличается от поведения образцов №1-3, то при $\sim 2 \cdot 10^3$ числе циклов наступает «пробой» покрытия и резко увеличивается коэффициент трения, достигая значения 0,09.

4.3. Анализ фреттингостойкости ТСП, сформированных методом микродугового оксидирования (МДО).

В производстве ДЛА и ЭУ широко используются сплавы цветных металлов и особенно алюминиевые сплавы, которые многократно доказали свою работоспособность в составе деталей и сборочных единиц газотурбинных двигателей, жидкостных ракетных двигателей, самих летательных аппаратов, их систем и энергоустановок.

Так в ГТД и ЖРД алюминиевые сплавы используются в основном в гидроагрегатах: топливных, масляных, силовых и выбор конкретного материала в них определяется в основном температурой эксплуатации и силовым воздействием. Детали гидроагрегатов подвергаются различным видам изнашивания, таким как износ по механизму адгезионного взаимодействия (схватывание и фреттинг-износ), гидромеханическим видам изнашивания (гидроабразивный и абразивный износ, кавитационные разрушения), контактная усталость. Контактно-вибрационные нагрузки вызывают фреттинг-износ, защита от которого осуществляется как выбором материалов пар трения, так и использованием защитных покрытий, в том числе и твердосмазочных.

В производстве современных космических аппаратов (КА) широко используются различные алюминиевые сплавы, которые благодаря своему низкому удельному весу и высокой удельной прочности доказали свою работоспособность в условиях действующих факторов космического пространства: высокого вакуума, перепадов температур, невесомости, излучения и др. Среди основных элементов сборочных единиц и систем важное место занимают системы обеспечения теплового режима и жизнеобеспечения, а в их составе элементы пневмогидросистем и электромеханики, трибологические пары трения которых требуют специальной защиты,

применение износостойких смазочных покрытий. Номенклатура используемых в этих узлах алюминиевых сплавов включает такие сплавы как АМг-3, АМг-6, Д16, АК4-1, АЛ9 и др. Эти же сплавы используются и при изготовлении гидроагрегатов ГТД и ЖРД.

Традиционно используемое анодирование алюминиевых сплавов, несмотря на достаточную твердость и стойкость к термическим и коррозионным нагрузкам, не может обеспечить достойное трибологическое поведение, в том числе и в условиях фреттинга, получаемого защитного слоя.

Поэтому в настоящей работе был использован метод микродугового оксидирования (МДО), который, как известно [97], позволяет формировать покрытия, по своим характеристикам превосходящие покрытия, получаемые при анодировании. МДО покрытия представляют собой керамику сложного состава. Нижние слои такого покрытия, прилегающего к металлу- подложке, состоят преимущественно из его оксидных и гидроксидных соединений. Во время роста покрытия в его состав поступают как элементы составляющих электролита, так и элементы легирования алюминиевых сплавов, образуя оксиды и гидроксиды сложного состава. Так формируются квазикерамические покрытия, демонстрирующие износостойкость сравнимую с композитами на основе карбида вольфрама, диффузионных барьерных покрытий и корундов [98].

В настоящей работе в качестве исходного материала был выбран алюминиевый сплав АМг-6, широко используемый в элементах систем КА и, в частности, пневмогидравлических и электромеханических системах обеспечения теплового режима (СОТР).

На первом этапе исследований были проведены сравнительные испытания по определению влияния МДО обрабатываемости алюминиевого сплава АМг-6 на его износные характеристики, принимая во внимание склонность такого типа сплавов к заеданию (схватыванию) даже при небольших нагрузках [99].

МДО покрытие было сформировано с использованием источника питания переменного тока в гальваническом режиме при плотности тока $j = 10 \text{ А/дм}^2$ в течении 180 мин при средней температуре электролита $25 \text{ }^\circ\text{C}$ в силикатно-щелочном электролите состава $C_{\text{KOH}} = 1 \text{ г/л}$, $C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3} = 6 \text{ г/л}$. Суммарная толщина покрытия составила 50 мкм.

Исследование фреттинг-изнашивания было проведено при следующих условиях испытаний: перемещение $D = 2,5\text{-}60 \text{ мкм}$; нормальная нагрузка в контакте $F_n = 5\text{-}50 \text{ Н}$; частота перемещения $f = 20 \text{ Гц}$; количество циклов $N_{\text{ц}} = 10^4$. Все эксперименты происходили в лабораторных условиях: температура окружающей среды – 23°C , влажность – 30%. В качестве модельного контакта использовали схему сфера/плоскость.

Перед детальным исследованием сформированного МДО покрытия на различных режимах фреттинга было исследовано трение подложки из АМГ-6 для различных пар трения, как это показано в Таблице 19.

Таблица 19. Пары трения первого этапа исследования

Номер пары трения	1	2	3
Материал подложки	АМГ6	АМГ6	АМГ6
Покрытие	Нет	МДО (шлифованное)	МДО («шуба»)
Контргело	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃

Изменение коэффициента трения в зависимости от количества циклов фреттинга, при нагрузке 50 Н, перемещение 40 мкм и частоте 20 Гц, показано на рис.4.23.

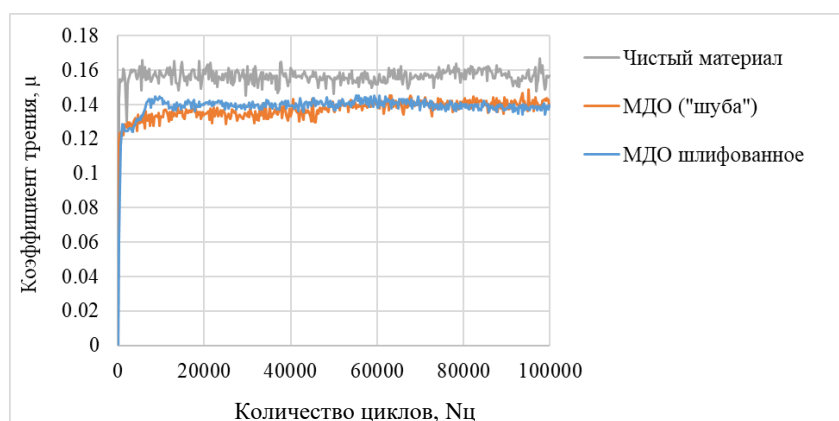


Рис. 4.23. Зависимость коэффициента трения μ АМГ-6 с покрытием и без от количества циклов.

На этом графике показаны три зависимости, связанные с тремя различными состояниями поверхности из АМГ-6: без покрытия, с МДО покрытием без обработки (шлифования) и с МДО покрытием шлифованным. Во всех трех случаях коэффициенты трения резко увеличиваются на первых циклах изнашивания. Изменение значения коэффициента трения в паре АМГ-6/ Al₂O₃ скорее всего связано с изменением морфологии износа и степени окисления [100], т.е. это связано с переходом от механизма износа пары АМГ-6/ Al₂O₃ к механизму изнашивания оксидной пленки (хрупкой), образующейся в результате окисления, которая несколько снижает коэффициент трения. В двух других случаях покрытие МДО является окисленной пленкой (покрытием), которая практически сразу уменьшает коэффициенты трения с 0,16 до 0,13. Сниженный коэффициент трения керамического покрытия с шубой, по сравнению со шлифованным покрытием, связан с тем, что разрушающаяся «шуба», представляющая собой верхний технологический слой МДО покрытия, является источником «третьего тела», снижающим коэффициент трения до тех пор, пока оно не будет удалено из зоны фреттинга, что произошло при $5 \cdot 10^4$ циклах.

Сравнение объемного износа образцов Wv, мкм³, представленное на рис.4.24, показало, что наличие «шубы» в покрытии приводит и к уменьшению износа.

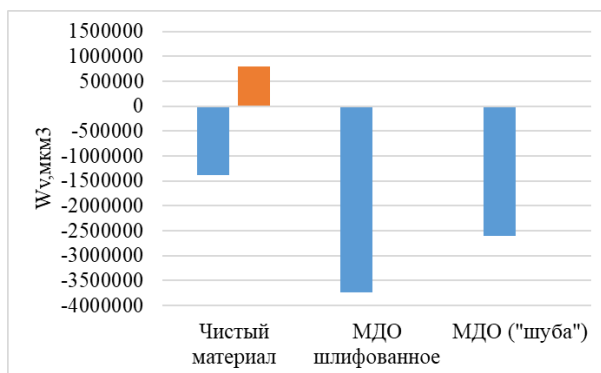


Рис.4.24. Диаграмма сравнения износа на образцах.

Высотный профиль АМг-6/ Al₂O₃ полученный на конфокальном оптическом микроскопе Olympus LEXT OLS 5000 представлен на рис.4.25.

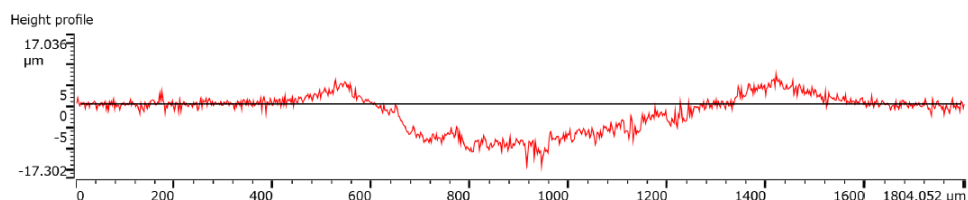


Рис.4.25. Высотный профиль

Из анализа высотного профиля следует, что поскольку предел текучести материала АМг-6 варьируется от 170МПа до 320МПа, а давление Герца при нагрузке 50Н, по оценке, составляет 1150 МПа, то при фреттинге этой пары трения материал вытесняется к краям пятна износа, что также подтверждено фотографиями пятна на рис.4.26.

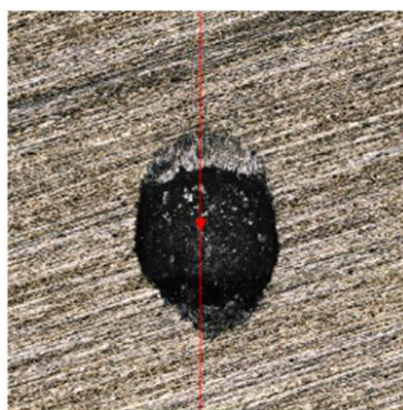


Рис.4.26. Пятно контакта при фреттинге.

Таким образом по результатам проведенных предварительных исследований фреттинг-изнашивания при выбранных режимах фреттинга было установлено, что износ шлифованного МДО покрытия выше чем у других образцов, и на чистом сплаве АМг-6 наблюдаются следы пластической деформации (рис.4.25, 4.26), при этом петли гистерезиса были неизменными для

всех покрытий, и имели узкую эллипсоидную форму (Рис.4.27), что указывает на реализацию режима частичного скольжения, как это следует из рис.4.27.

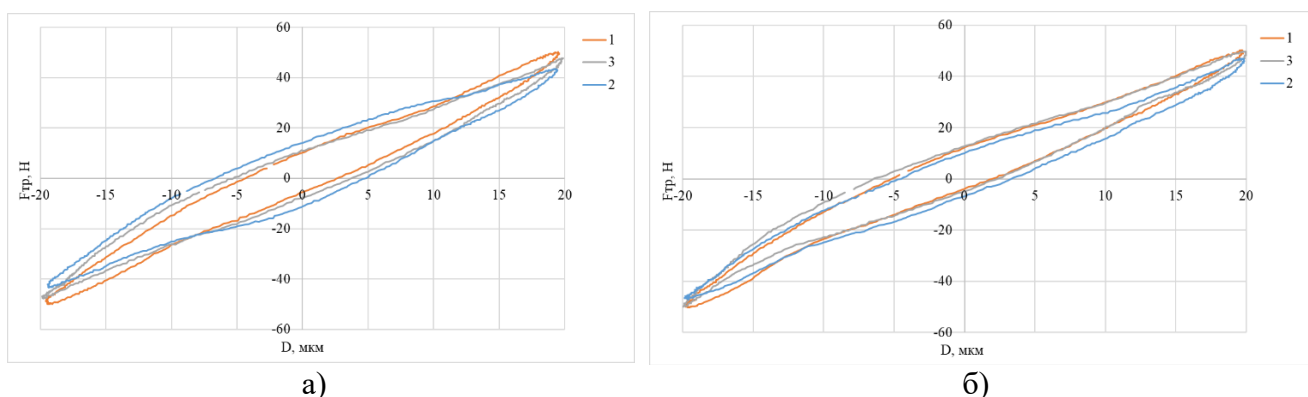


Рис.4.27. Изменение петли гистерезиса чистого материала (1), МДО шлифованного (2) и МДО не шлифованного (3): а - в начале испытаний; б - в конце испытаний.

Как уже было сказано выше, общее поведение фреттинга пар трения, в заданных условиях контакта и режимах фреттинга, например, таких как механизмы износа, зарождение трещин и т.п. можно описать с помощью построения и анализа карт фреттинга. Наибольшее распространение получили карты фреттинга в условиях фреттинг-изнашивания [101], построение которых осуществляется в координатах нормальная нагрузка - величина смещения. Три таких карты, построенные для пар трения: АМг-6/ АМг-6, АМг-6/ Al_2O_3 и МДО/ Al_2O_3 представлены на рис.4.28, 4.29 и 4.30 соответственно. Пара трения АМГ-6/ АМГ-6, представляла вариант штатной пары трения, которая встречается в различных узлах ГТД, ЭУ и КА; пара трения АМГ-6/ Al_2O_3 была выбрана для исследования возможности улучшения трибологических характеристик пары трения АМГ-6/ АМГ-6 путем замены одного из элементов на керамику; пара трения МДО/ Al_2O_3 была выбрана как наиболее перспективная пара трения. Покрытие, полученное методом МДО, в паре трения МДО/ Al_2O_3 шлифовалось, поскольку внешний пористый слой в процессе трения будет разрушаться и образовывать огромное количество абразивных частиц, появление которых приведет к снижению ресурса узлов ГТД, ЭУ и КА.

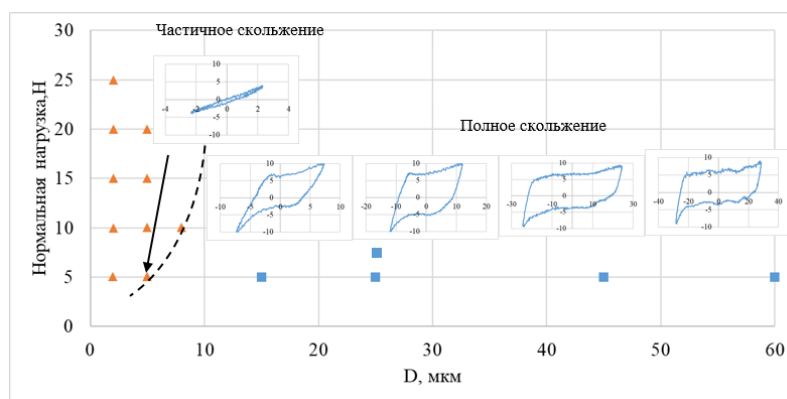


Рис.4.28. I-я карта фреттинга пары трения АМГ-6/ АМГ-6.

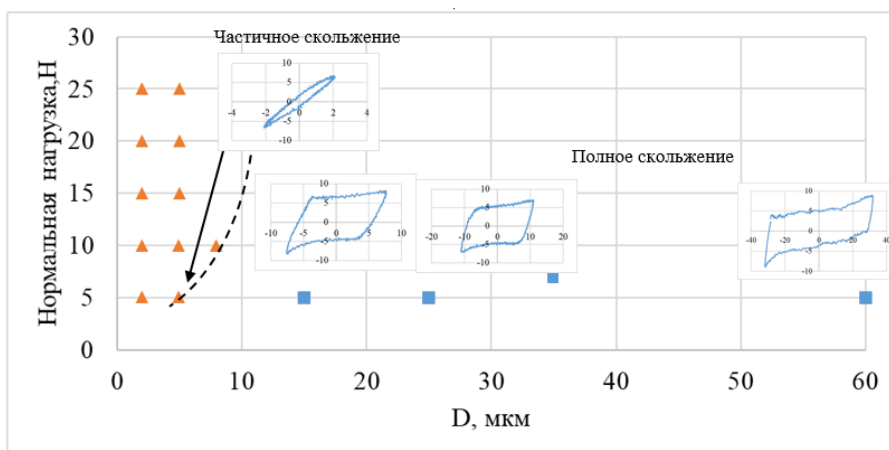


Рис.4.29. II-я карта фреттинга пары трения АМг-6/ Al₂O₃.

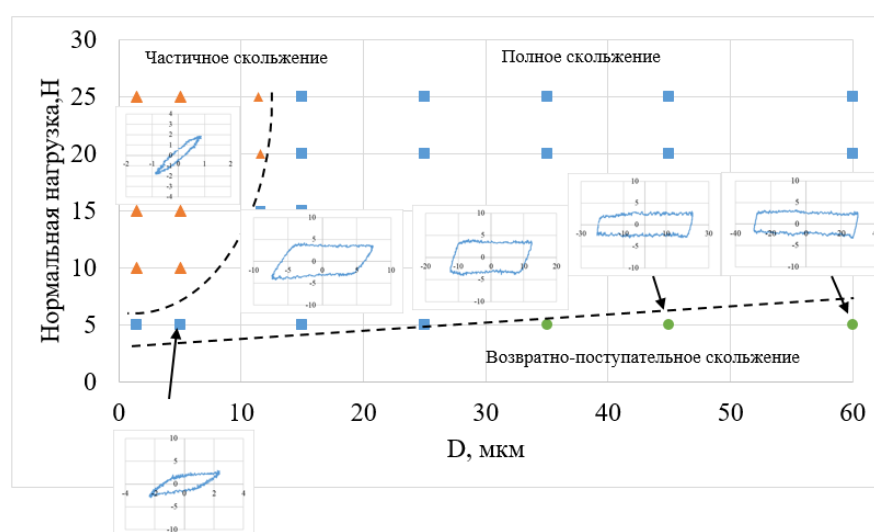


Рис.4.30. III-я карта фреттинга пары трения МДО/ Al₂O₃.

Как было отмечено выше, в зависимости от условий (режимов) нагружения (приложенная нагрузка, амплитуда смещения) и пар контактов материалов фреттинг может принимать форму образования «мусора» (фреттинг-износ), форму распространения трещин (фреттинг-усталость) или обе эти формы одновременно. Граница между этими формами определяются из характеристик параметров фреттинг-петель (коэффициент и индекс скольжения, рассеиваемая энергия), которые играют центральную роль в понимании поведения материалов в таких условиях.

В принятых в настоящем разделе исследования условиях нагружения и пары контактов на основе только АМг-6, и как следует из обработки петель гистерезиса и анализа полученных карт фреттинга были обнаружены два основных режима:

- режим частичного скольжения ($Q < \mu P$), характеризующегося грубым повреждением материала поверхности при уменьшении контактной жесткости, определяемой наклоном петли в $F_{тр}-D$ координатах; режим имеет узкую петлю овальной формы и

- часто высокую силу сдвига, при не очень большой площади [102];
- режим полного скольжения ($Q \geq \mu P$), при котором максимальная сила трения равна μP и контакт будет находиться в режиме скольжения в течении некоторой части цикла фреттинга; характеризующиеся квази-прямоугольными циклами часто с сильно меняющейся максимальной тангенциальной силой в конце цикла (так называемые «крючки»).

Характерные и наблюдаемые в нашем случае «крючки» на петлях при полном скольжении (карты I и II) соответствуют приходу контртела к концу петли. Это явление характерно для пластических материалов, к которым относится сплав АМг-6, и обеспечивается взаимодействием контртела с фронтальными пластическими скоплениями материала на периферии пятна износа (рис.4.25).

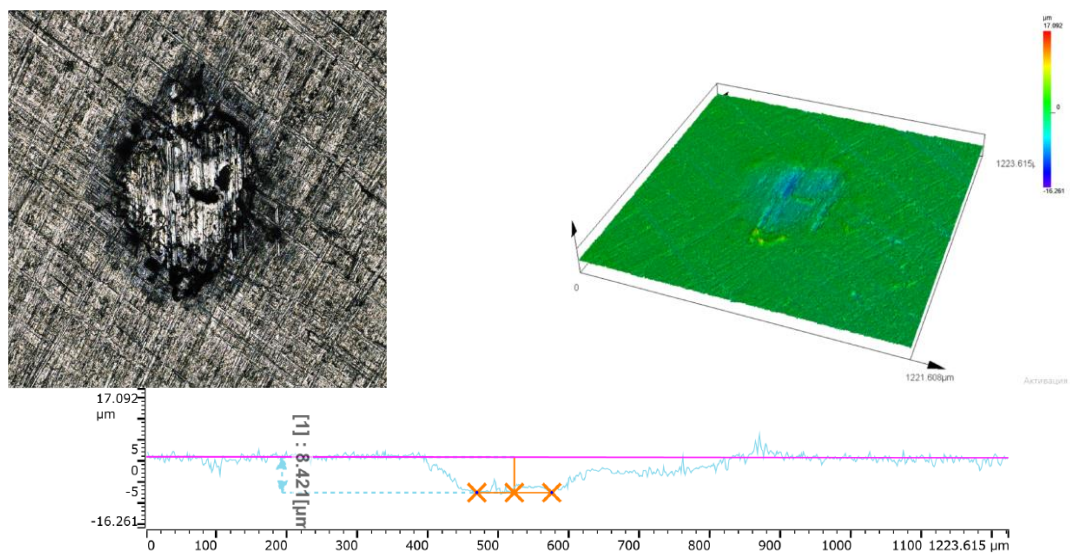
Дальнейшее развитие, в нашем случае, полное скольжение получает уже в форме возвратно-поступательного скольжения (при нагрузках ≤ 5 Н) практически при всех значениях смещения D.

Если при частичном скольжении изнашивание происходит только в областях скольжения, то при полном скольжении износ происходит по всему контакту.

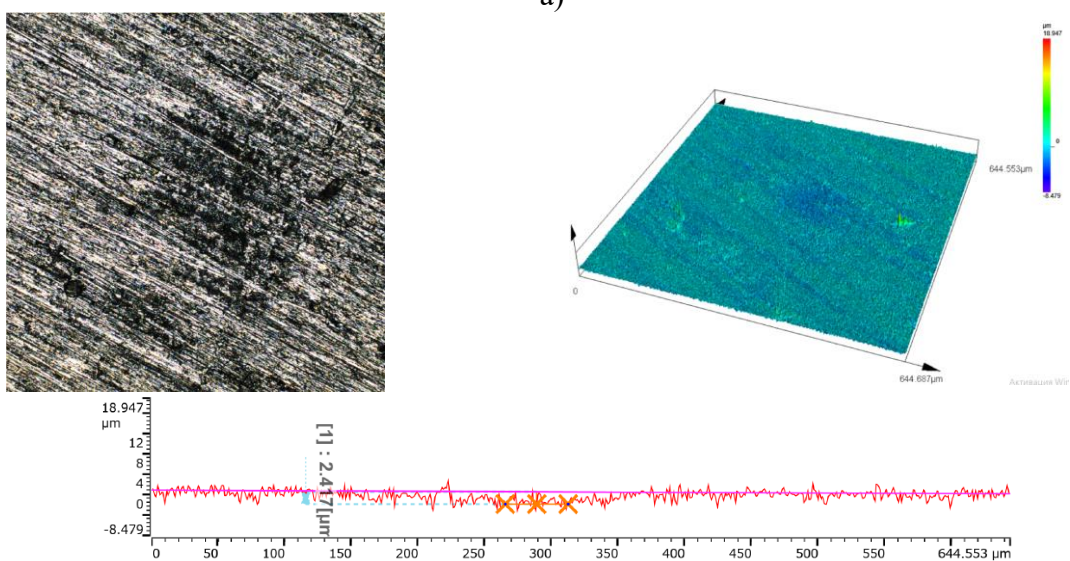
Режим смешанного фреттинга, при котором форма петли меняется между формами, связанными с режимами частичного и полного скольжения в наших условиях нагружения в явном виде обнаружены не были.

Таким образом для принятых условий нагружения составленные карты представляют собой карты типа RCFM, оценивающие условия нагружения и соответствующие им виды изнашивания. Построение же карты отклика материала (MRFM) представляется намного более сложной задачей и отнимает много времени, поскольку для определения каждого режима требуется выполнение большего количества испытаний.

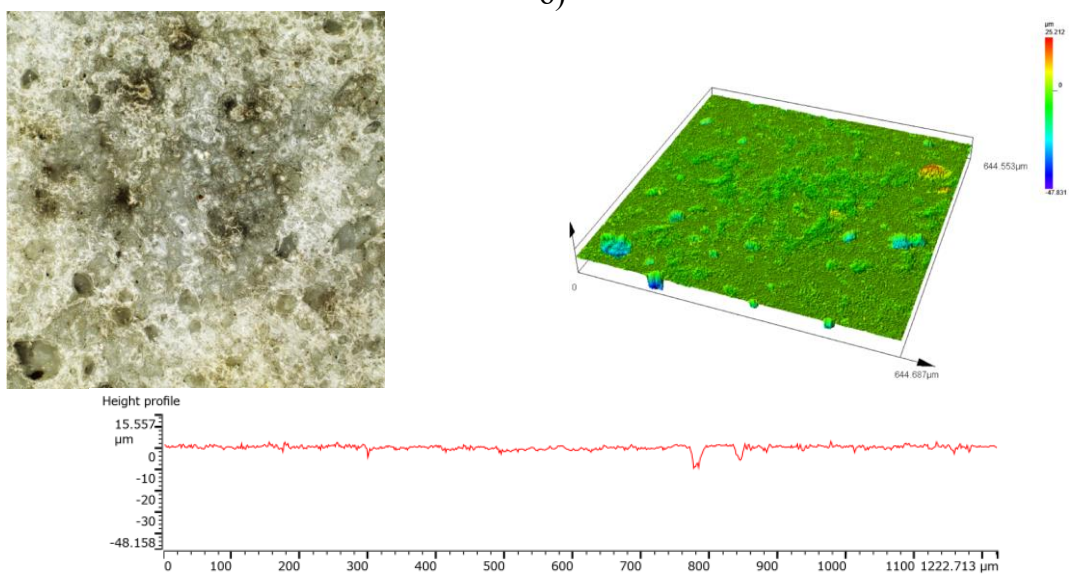
Однако для некоторых, наиболее характерных режимов фреттинга такие испытания (без проведения электронной микроскопии и рентгеновского микроанализа) были проведены и получены результаты, которые позволили расширить представление о фреттинг-изнашивании для заданных условий нагружения. Так, для области упругого взаимодействия отсутствие (или малые) перемещений и большие нагрузки в рамках заданных условий нагружения были проведены испытания при: нормальной нагрузке 25Н и величине смещения в 2,5 мкм. Полученные результаты для всех трех карт I-III представлены на рис.4.31 – 4.33.



а)



б)



в)

Рис.4.31. Пятна износа на плоском образце пар трения АМг-6/ АМг-6 (а), АМг-6/ Al₂O₃ (б) и МДО/ Al₂O₃ (в)

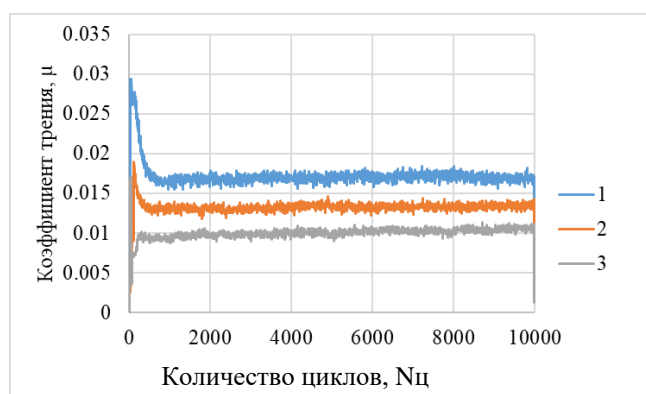


Рис.4.32. Зависимость коэффициента трения от количества циклов

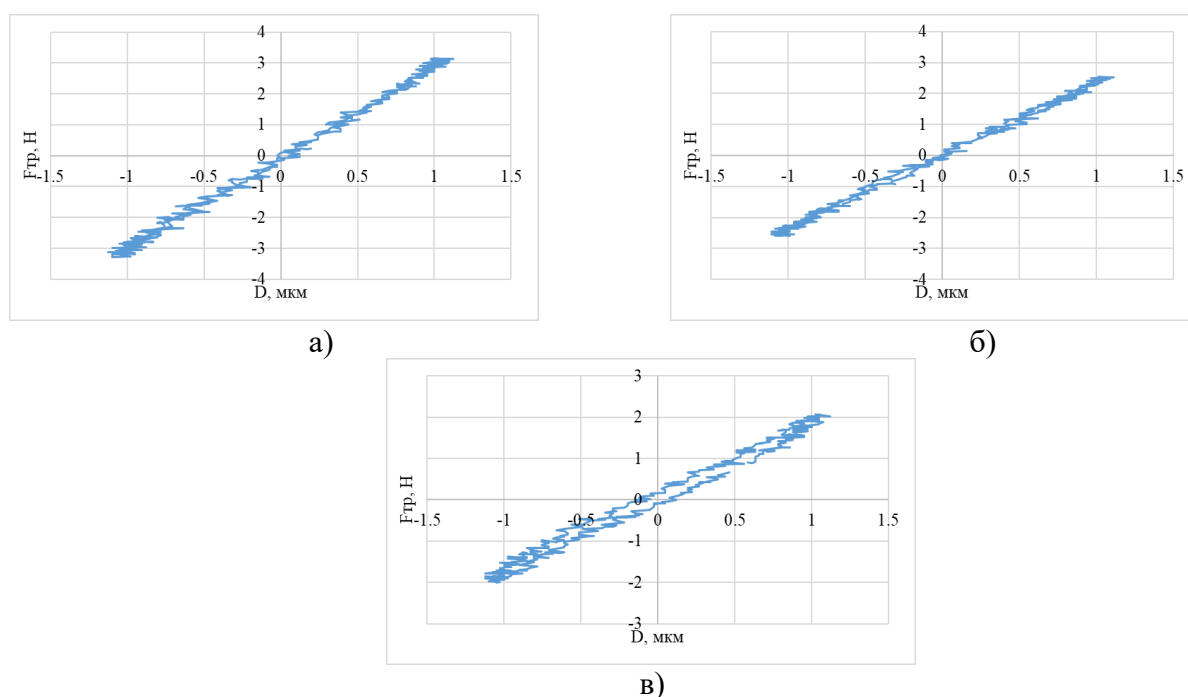


Рис.4.33. Сравнение петель гистерезиса пар трения АМГ-6/ АМГ-6 (а), АМГ-6/ Al_2O_3 (б) и МДО/ Al_2O_3 (в)

В пятне контакта (рис.4.31а) наблюдаются зоны абразивного и адгезионного износа, глубина износа составила 8мкм. При использовании контртела из Al_2O_3 (рис. 4.31б) наблюдается отсутствие следов износа, однако при этом произошла еле заметная деформация плоского образца на глубину 2мкм. У образца с керамическим покрытием, полученным методом МДО (рис. 4.31в), на поверхности отсутствуют следы взаимодействия тел. Изменение коэффициента трения представлено на рис.4.32. При этом петли гистерезиса для всех трех экспериментов (рис.4.33), построенные в конце эксперимента, практические не отличаются между собой и в ходе эксперимента, различаются только углы наклона петель.

Для области полного скольжения для тех же пар трения были проведены испытания материала и покрытий при: нормальной нагрузке 5Н и величине смещения в 25 мкм. Полученные результаты для всех трех карт I-III представлены на рис.4.34-3.36

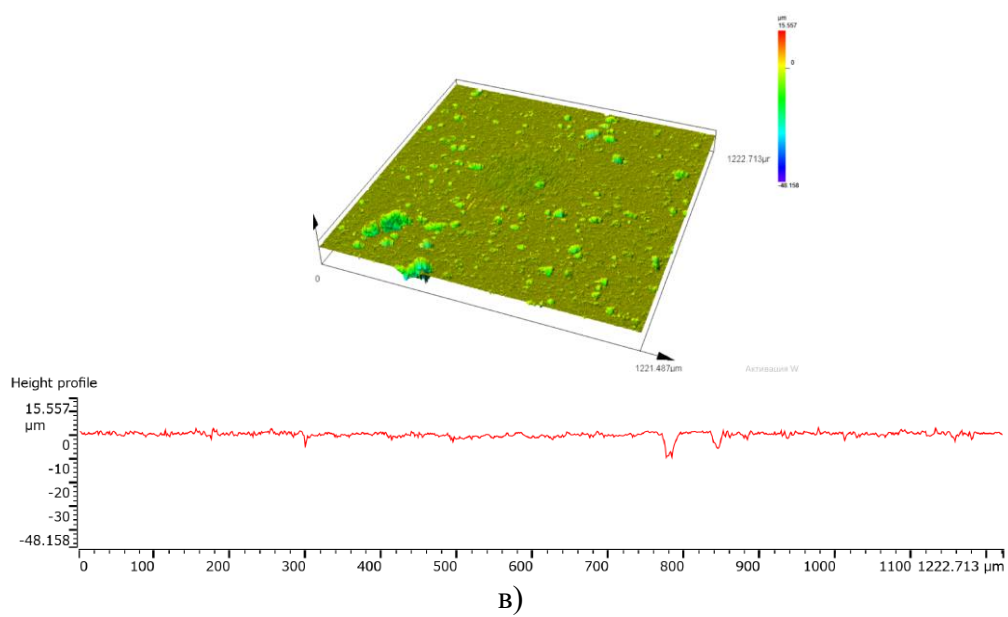
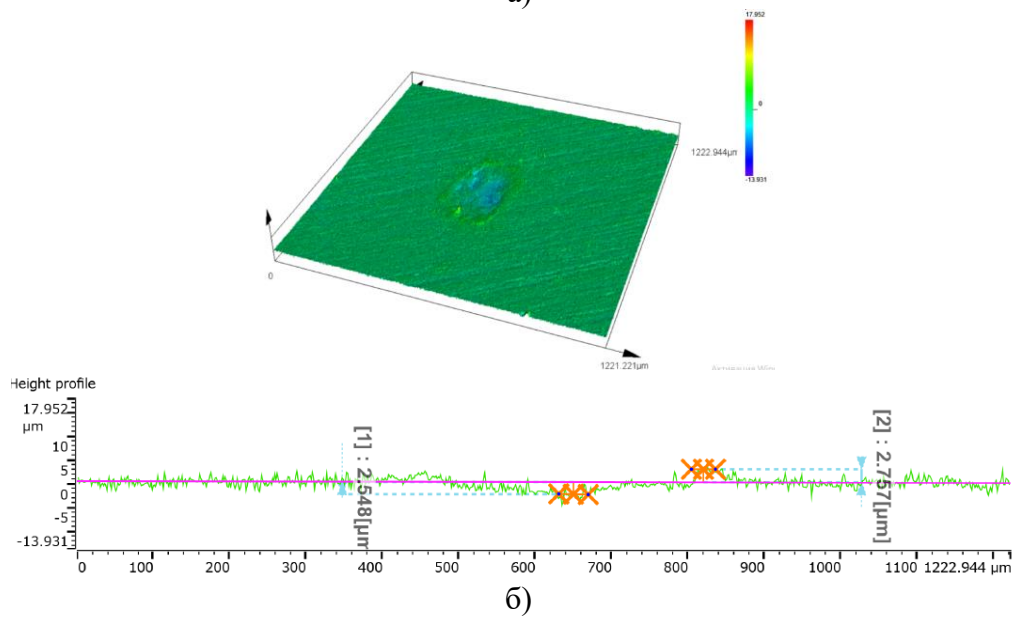
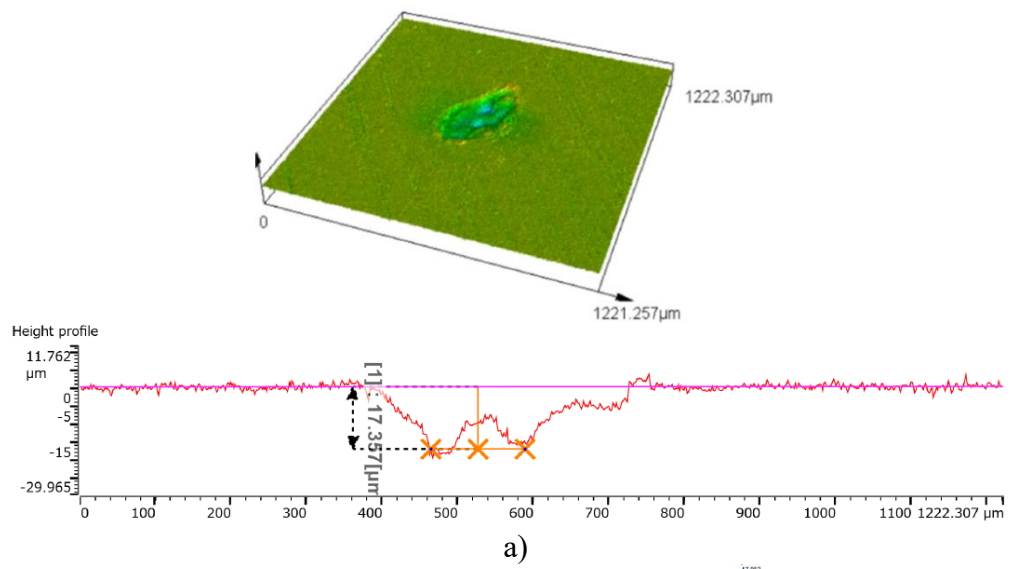


Рис.4.34. Пятна износа на плоском образце пар трения АМГ-6/ АМГ-6 (а), АМГ-6/ Al_2O_3 (б) и МДО/ Al_2O_3 (в)

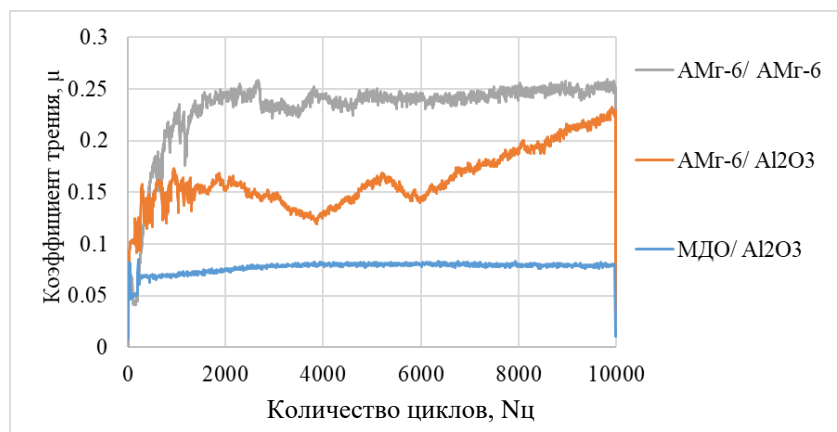


Рис.4.35. Зависимость коэффициента трения от количества циклов.

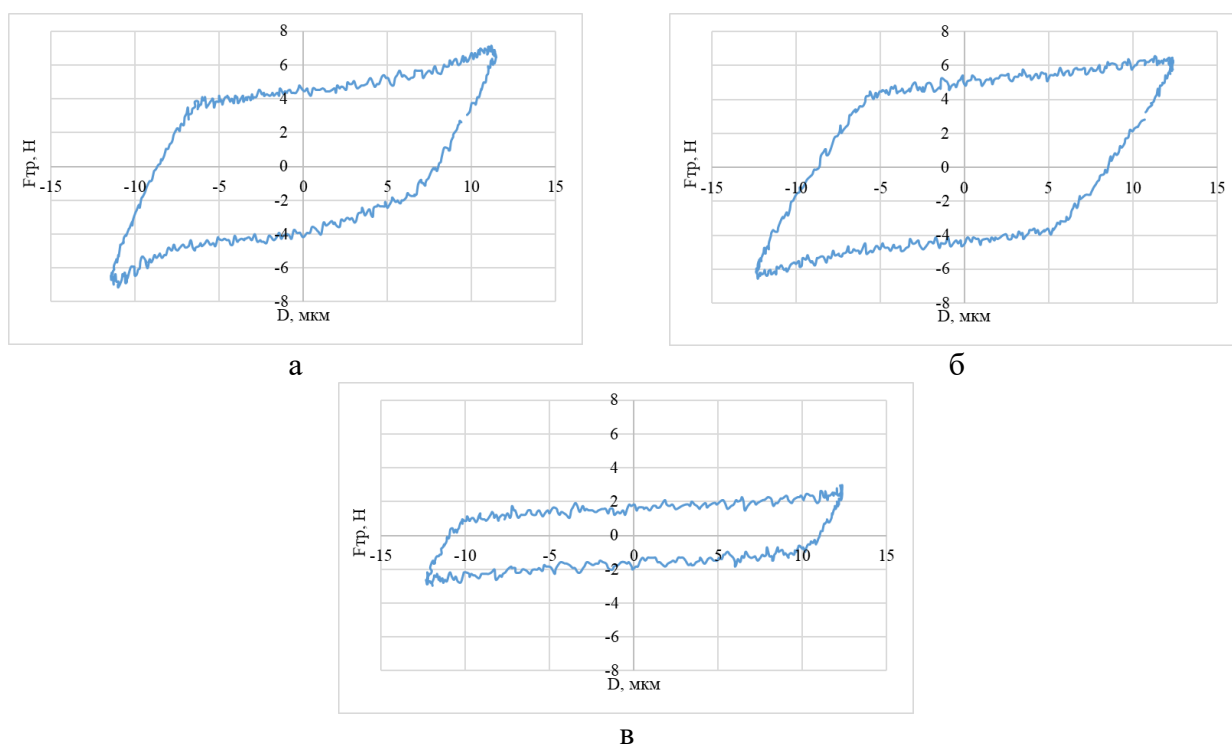


Рис.4.36. Сравнение петель гистерезиса пар трения АМг-6/ АМг-6 (а), АМг-6/ Al₂O₃ (б) и МДО/ Al₂O₃ (в)

При испытании пары трения в режиме полного скольжения в пятне контакта (рис.4.34 а) наблюдаются также следы абразивного и адгезионного износа, о чем свидетельствует пятно износа, полученное на плоском образце пары АМг-6/ АМг-6. В центре пятна наблюдается небольшое возвышение, при этом глубина износа составила 17мкм. Замена контртела в паре трения на оксид алюминия (рис. 4.34 б) позволила снизить износ, в результате чего максимальная глубина износа составила 2мкм. По краям пятна наблюдаются сдвинутые «пропахиванием» валики («крюки») материала подложки АМг-6. Формирование керамического покрытия позволило избежать адгезионного износа (рис. 4.34 в) и перейти от режима полного скольжения к границе перехода между полным скольжением и возвратно-поступательным скольжением.

Показательной для случая этого нагружения является зависимость коэффициента трения от количества циклов. Характерно то, что большие коэффициенты трения и большие величины износа для первых двух пар трения, а также отсутствие измерений в области нагрузки выше 7,5 Н – 30 Н и смещение 10-60 мкм указывает на вероятное увеличение износа и увеличение силу схватывания (заедания), поскольку вибратор машины трения не может преодолеть эту силы и вынужден отключаться. Об увеличении силы затрачиваемой на трение свидетельствуют и величины энергии диссипации, затрачиваемой на трение (увеличение площади петель гистерезиса).

4.4. Влияние графита и MoS₂ в составе ТСП, полученных атмосферным плазменным напылением на их фреттингостойкость

Решение проблем выбора состава ТСП, разработки конструкций и метода нанесения на детали пар трения ДЛА и ЭУ прежде всего связано с анализом особенностей конструкции этой пары трения и условий ее эксплуатации. В настоящем разделе в качестве примера рассматривается вопрос использования ТСП для защиты от фреттинг-изнашивания один из наиболее нагруженных узлов трения, изготовленных из титановых сплавов: узел крепления вентиляторных лопаток, выполненный из титанового сплава, в диске со следующими максимальными значениями контактного давления (давление Герца) доходящими до значений 500-600 МПа и выше.

По данным [103], материалы с относительно низкими значениями предела прочности на разрыв и сдвиг, к которым относится и титан, демонстрируют высокие значения коэффициента трения и большой перенос материала к поверхности контртела. Кроме того, большое сродство титана к кислороду приводит к формированию окисленного поверхностного слоя, который сцепляется с поверхностью контртела и приводит к тяжелому адгезионному износу.

Таким образом, хотя титановые сплавы и предлагают привлекательные механические и физические характеристики, свойства их поверхностей недостаточны для использования в различных трибологических приложениях. И для того, чтобы использовать все преимущества титановых сплавов в этих случаях требуется обработка их поверхности или модифицированием, увеличивая поверхностную прочность, или формируя ТСП покрытия, тем самым уменьшая коэффициент трения и понижая тенденцию к переносу материала и адгезивному износу [104].

Использование минеральных масел и полихлорфторсилоксановых жидкостей в качестве смазок для титана также не дает положительных результатов. Во всех случаях коэффициент трения существенно не снижается. По данным [105,106], из применяемых смазочных материалов только графит и дисульфид молибдена могут обеспечить удовлетворительную, хотя и кратковременную смазку титана. Поэтому для закрепления этих смазочных материалов их

необходимо вводить в состав ТСП, формируемых различными методами газотермического напыления, в том числе и плазменного напыления.

Известно, что западные авиационные компании использовали длительное время для защиты от фреттинг-износа узла трения: диск – замок вентиляторной лопатки технологию плазменного напыления, предложенную фирмой General Electric, США, напыляя покрытия состава $58,5\text{Cu} - 36,5\text{Ni} - 5\text{In}$ [107]. Очевидно, что сплав системы CuNi был выбран как высокоэффективный подшипниковый материал, в который дополнительно был введен индий In, выбранный из-за способности образовывать поверхностные пленки с низким сопротивлением к сдвиговым напряжениям. Кроме того, авторы [107] также сообщают, что, используя естественную пористость плазменнонапыленного покрытия, на его поверхность можно нанести твердую смазку MoS_2 и, сохранив ее в порах, дополнительно защитить место контакта от фреттинга и коррозии.

В настоящей работе была предпринята попытка улучшить свойства этого покрытия, используемого в более легких условиях эксплуатации и, прежде всего, по контактному давлению. Известно, что компаундирование нескольких антифрикционных компонентов является одним из приемов улучшения эксплуатационных свойств ТСП. Наиболее известным сочетанием антифрикционных компонентов, обеспечивающим синергетический эффект, является смесь дисульфида молибдена и графита.

Дисульфид молибдена придает ТСП высокую нагрузочную способность, эффективен в покрытиях, эксплуатирующихся в разреженной среде. Графит обеспечивает более высокую износостойкость ТСП при относительно низких нагрузках, превосходит дисульфид молибдена по теплостойкости, пригоден для покрытий, работающих при повышенной влажности [108,109].

В работах [109,110] приводятся сведения об успешном введении в состав ТСП на основе MoS_2 добавок графита. При этом введение уже 15% объемных частей графита снизило коэффициент трения ТСП до условия, характерного для ТСП на основе чистого графита, работающего на воздухе, сохраняя при этом несущую способность композиционной смазки из MoS_2 .

Большое внимание при разработке ТСП уделяется проектированию конструкции покрытия. К настоящему времени в узлах трения авиационной и ракетно-космической техники широкое применение нашли ТСП «пленочного» (тонкослойного) типа, получаемые различными методами: натирание (шаржирование), диффузионное насыщение, гальваническое осаждение, химическое осаждение, электрофорез, физические методы осаждения в вакууме (методы PVD и CVD), осаждение с использованием органических связующих.

Покрытия на основе органических связующих представляют собой композицию, состоящую из мелкодисперсного порошка твердой смазки с размеров частиц 1...3 мкм и

связующего материала на основе синтетических смол. В качестве смазочного компонента в таких покрытиях используются индивидуальные соединения (такие, как MoS_2 , графит, некоторые другие вещества и их смеси), которые и обеспечивают антифрикционные, противоизносные и противозадирные свойства. Связующее обеспечивает адгезию частиц твердой смазки к металлическим поверхностям и связывает отдельные частицы в сплошную пленку, которая после нанесения и отверждения напоминает лакокрасочные покрытия. Однако, покрытия данного типа характеризуются наличием ограничений по допустимой величине линейного износа из-за малой толщины покрытия, небольшой несущей способности к контактным напряжениям, отсутствием сопротивления к абразивному износу, малой величине теплопроводности, ограниченной химической стойкостью в агрессивных средах [111].

Для использования в высоконагруженных агрегатах авиационной и ракетно-космической техники с увеличенным ресурсом наиболее перспективны относительно толстослойные (до 200...300 мкм) ТСП, построенные в виде многослойной конструкции на основе износостойких матриц из неорганических материалов и наносимые методом плазменного напыления.

Впервые такая работа по разработке толстослойного и многослойного покрытия, применительно к замкам вентиляторных лопаток, использующего синергию графита, MoS_2 и коллоидного графита, полученного плазменным напылением, была проведена на каф. 205 МАИ [112], и была закреплена патентом РФ [113]. Дополнительно для повышения твердости и жесткости подложки – образца, выполненного из титанового сплава TA6V (аналог титанового сплава BT6), первым слоем был напылен слой из терморегулирующего порошка NiAl, дополнительно повысив адгезию всего покрытия. Фотография этого антифреттингово покрытия, разработанного для следующих условий эксплуатации: контактное давление – 600 МПа, амплитуда – 0,2 мм, частота – 20 Гц, температура - 20 °С, окружающая среда – воздух, форма контакта представляла собой цилиндр – цилиндр, ресурс – 10 часов, и принятого в качестве прототипа в настоящей работе, представлена на рис. 4.37.

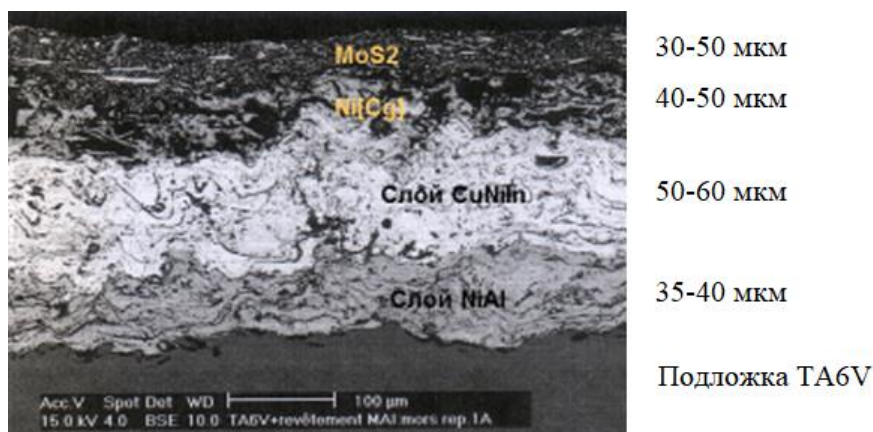


Рис. 4.37. Покрытие – прототип исходной конструкции NiAl – CuNiIn - Ni[Cg] + MoS_2 + коллоидный графит (пропитка) на срезе [112, 113].

Настоящая работа является продолжением и развитием этих исследований с использованием существенно модернизированной машины трения 3308, которая, как было сказано ранее, оснащена датчиками силы Kistler для измерения силы трения и лазерным триангуляционным датчиком PФ603HS для измерения перемещения. Модернизация машины трения позволила проводить оценку и прогнозировать ресурс покрытий с помощью энергетического подхода. Оптический конфокальный микроскоп Olympus LEXT OLS 5000 использовался для определения величины износа, длины хорды и визуальной оценки повреждений. Поэтому для дальнейшего исследования твердосмазочных покрытий, работающих в новых заданных условиях эксплуатации, были выбраны следующие составы опытных образцов многослойной конструкции покрытий: NiAl+CuNiIn+Ni[Cg], NiAl+CuNiIn+Ni[Cg] + Molykot 106, NiAl+CuNiIn+Ni[Cg] + пропитка коллоидным графитом+ Molykot 106.

Образцы для трибологических испытаний были изготовлены из прутка титанового сплава ВТ6 и представляли собой сегменты колец Ø 20 мм и шириной 4 мм, разрезанные на четыре равные части, как показано на рис.4.38.

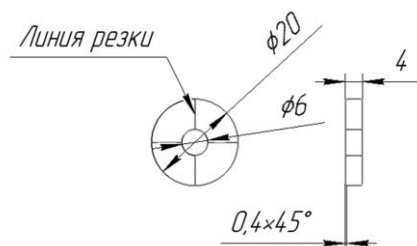


Рис.4.38. Образцы для трибологических испытаний.

Измеренная шероховатость внешней цилиндрической поверхности после шлифования не хуже $Ra = 0.63$ мкм. После механической обработки образцы промывались в ацетоне и дистиллированной воде, а затем упаковывались.

Нанесение ТСП методом напыления осуществлялось на установке ОАО «ТСЗП» с использованием плазмотрона F4. В рамках работы рассматривались покрытия, представленные в Таблице 20. Режимы плазменного напыления представлены в Таблице 21. Molykote 106 - антифрикционное покрытие на основе дисульфида молибдена с эпоксидным связующим, отверждаемое при нагреве.

Таблица 20. Составы антифреттинговых покрытий для сравнительных испытаний.

№ покрытия	Слой 1	Слой 2	Слой 3	Слой 4	Слой 5	Ra, мкм
1	NiAl	CuNiIn	Ni[Cg]	-		10
2	NiAl	CuNiIn	Ni[Cg]	-	Molykot 106	11,035
3	NiAl	CuNiIn	Ni[Cg]	Коллоидный графит	Molykot 106	11

Таблица 21. Режимы плазменного напыления.

Параметры плазменного напыления	Слои покрытия		
	NiAl	CuNiIn	Ni[Cg]
Расход аргона, л/мин	35	52	30
Расход водорода, л/мин	7	3,2	8
Ток, А	550	420	550
Диаметр и угол инжекторов	2; 90°	2; 90°	2; 90°
Обороты диска питателя	0,5	0,6	2,4с/ 2,5к
Расход транспортирующего газа, л/мин	3	4,5	4
Напряжение, В	69	66	68
Мощность, кВт	38	28	38
Дистанция напыления, мм	130	90	105
Скорость перемещения горелки, м/с	0,3	0,3	0,3
Количество проходов	1	3	2
Толщина покрытия за проход, мкм	15	30	40
Суммарная толщина покрытия, мкм	185		

Исследовалось влияние амплитуды возвратно-поступательного перемещения образцов на трибологические характеристики покрытий по схеме цилиндр/ цилиндр на машине трения 3308 при следующих режимах трибологических испытаний: частота – 10 Гц, нормальная нагрузка – 115Н, величина перемещения – 0,125, 0,325, 0,625 мм, количество циклов – 9000, запись петель гистерезиса каждый 600 циклов, контртело - титановый сплав ВТ6

Анализ результатов испытаний покрытий 1, 2 и 3 показал, что при величине перемещения в 0,125 и 0,325мм не наблюдается существенного износа покрытий, о чем свидетельствуют небольшие натирсы на поверхности образцов (рис.4.39-4.41).



Рис. 4.39. Изображение пятен износа покрытия NiAl+CuNiIn+Ni[Cg]:
а – 0,125мм; б – 0,325 мм

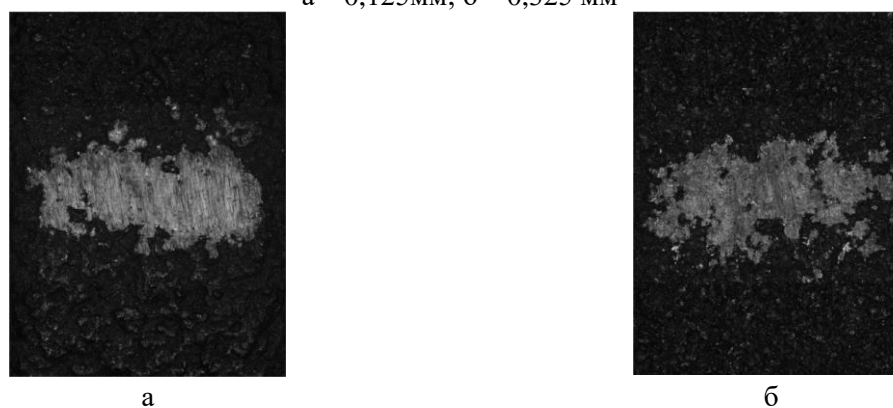


Рис. 4.40. Изображение пятен износа покрытия NiAl+CuNiIn+Ni[Cg]+ molykot 106:
а – 0,125мм; б – 0,325 мм

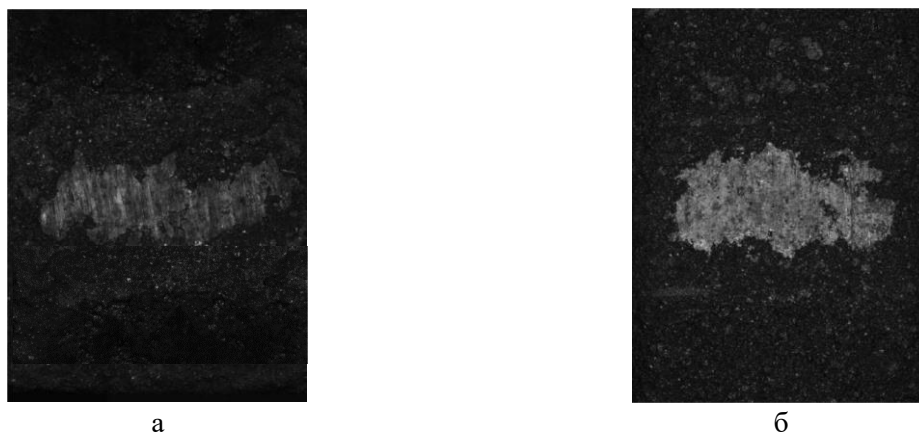


Рис. 4.41. Изображение пятен износа покрытия NiAl+CuNiIn+Ni[Cg]+ колл.С+ molykot 106:
а – 0,125мм; б – 0,325 мм

Коэффициенты трения для величины перемещения 0,125 и 0,325 имеют сходные значения (рис.4.42).

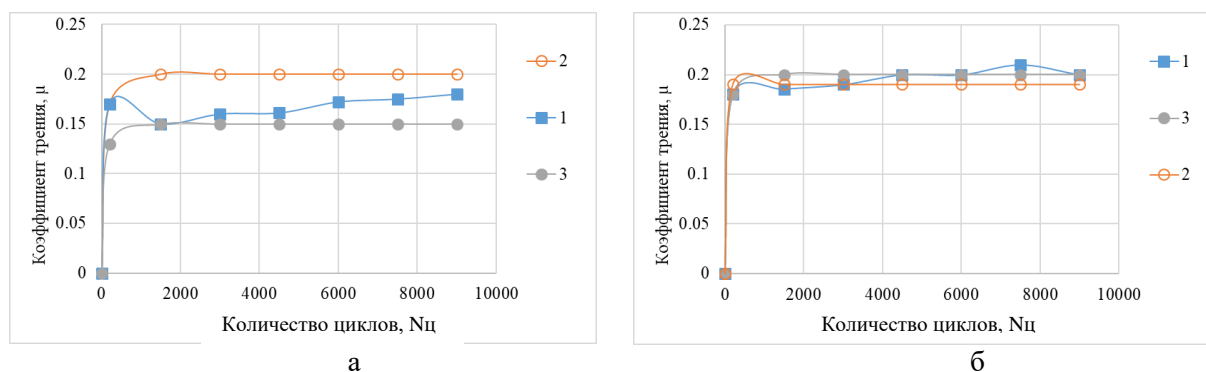


Рис.4.42. Зависимость коэффициента трения пар трения для перемещений:
а – 0,125мм; б – 0,325 мм

Однако при испытании пар трения при величине перемещения 0,625мм наблюдается значительный рост коэффициента трения (рис.4.43.) для пары трения №1 до 0,45 с последующим снижением до 0,35. Снижение коэффициента трения связано, в это случае, с образованием третьего тела в зоне контакта. Коэффициенты пары трения 1 и 2 имеют сходные значения в течении всего эксперимента.

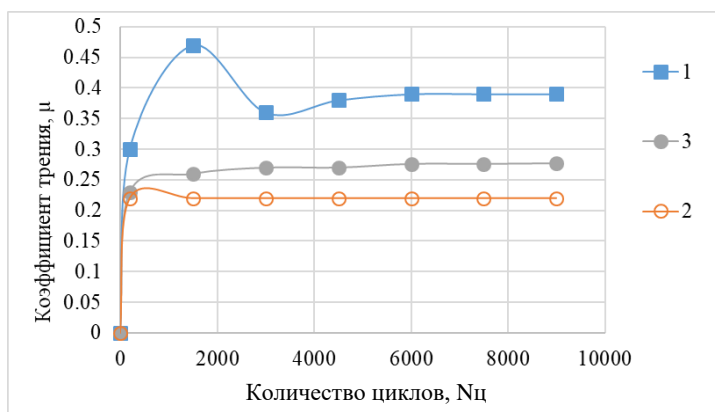


Рис.4.43. Зависимость коэффициента трения от количества циклов.

Исследование пятен износа пар трения (рис.4.44.) на оптическом микроскопе показало увеличение площади контакта пары трения 1 по сравнению с парами трения 2 и 3, а также появление большого количества царапин на поверхности контакта. Элементный анализ пятна износа на покрытии 1 представлен на рис. 4.45.

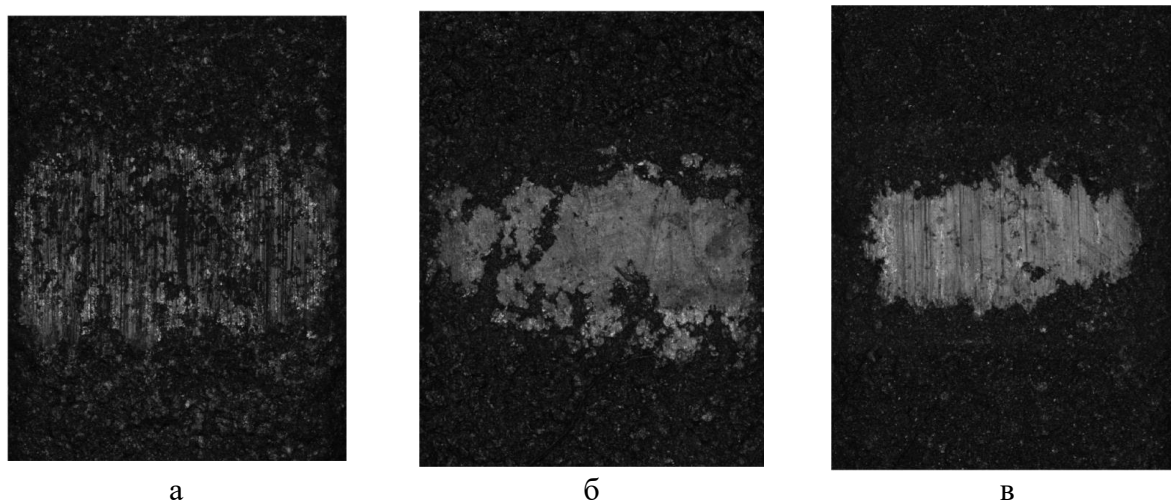


Рис.4.44. Изображение пятен износа пар трения при перемещении 0,625 мм:
а – 1; б – 2; в – 3.

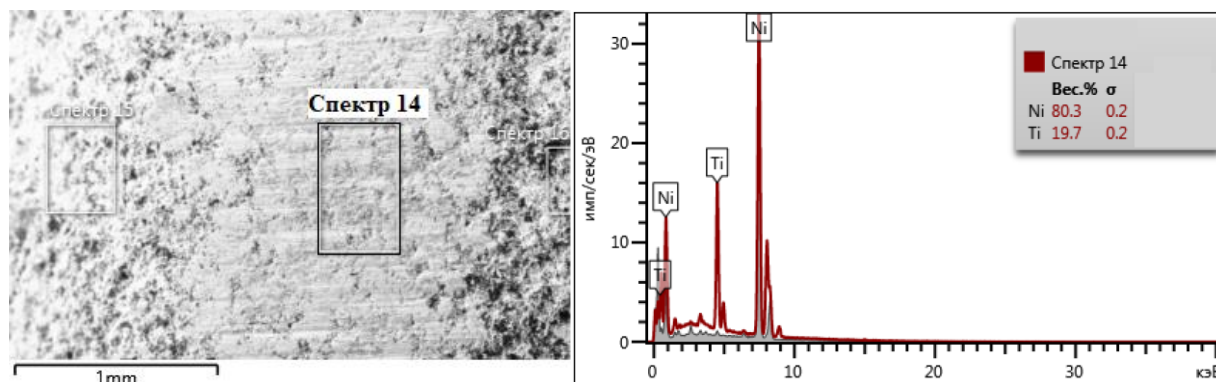


Рис.4.45. Элементный анализ пятна контакта.

Из анализа полученных данных можно предположить, что слой графита, перенесенный в начальный период времени на контртело из титанового сплава, начал разрушаться спустя несколько сотен циклов и начал происходить адгезионный процесс взаимодействия металлической матрицы покрытия (Ni) с титановым сплавом контртела рис.4.45, о чем свидетельствует наличие элементов титана в покрытии, что также привело к износу контртела (рис.4.46).

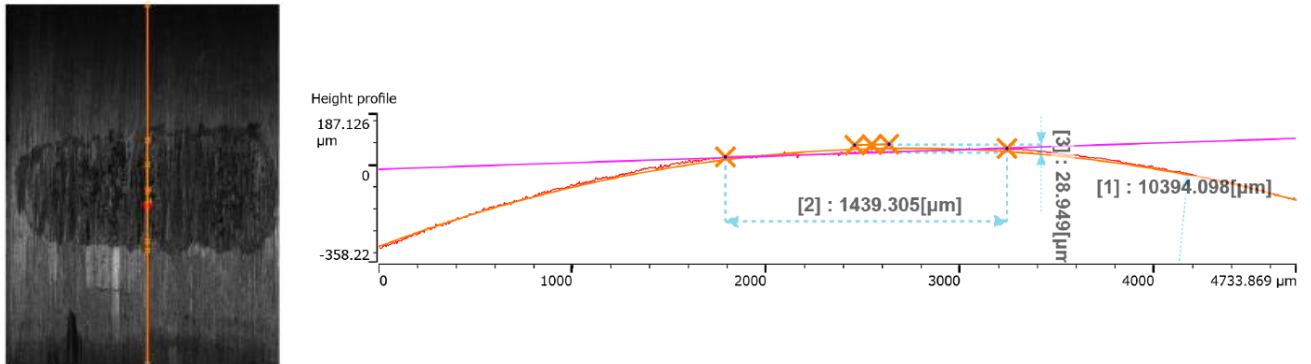


Рис.4.46. Длина хорды контртела.

Сравнение объемного износа пар трения в зависимости от величины смещения представлено на рис.4.47.

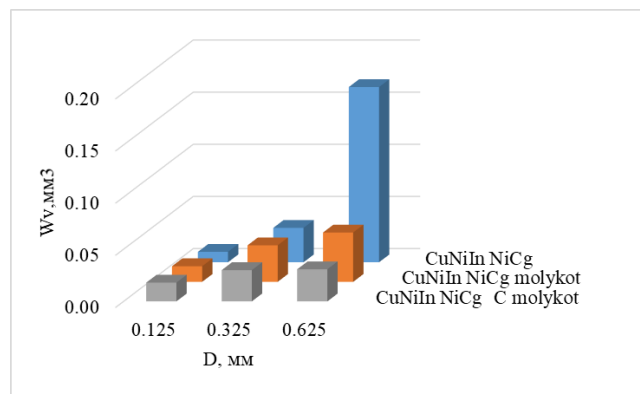


Рис.4.47. Величина износа в зависимости от величины перемещения.

Как уже отмечалось, технические возможности используемой машины трения позволили не только провести измерения коэффициентов трения для различных покрытий, но и определять энергию диссипации E_d , Дж, из обработки петель фреттинг-гистерезиса, затрачиваемой на разрушение покрытия за каждый цикл, оценить ресурс каждого покрытия при известной толщине. Разброс полученных значений не превышал 10%.

Энергию диссипации рассчитывали путём прямого измерения работы, затрачиваемой на разрушение покрытий, при одновременном измерении силы трения ($F_{тр}$, Н) и перемещения (D , мкм). На рис. 4.48. представлено сравнение петель гистерезиса $F_{тр}$ - D каждого покрытия при варьировании величины перемещения. Петли получены при возвратно-поступательном изнашивании за один цикл трения в конце каждого испытания. Запись петель велась непрерывно в течении всего эксперимента.

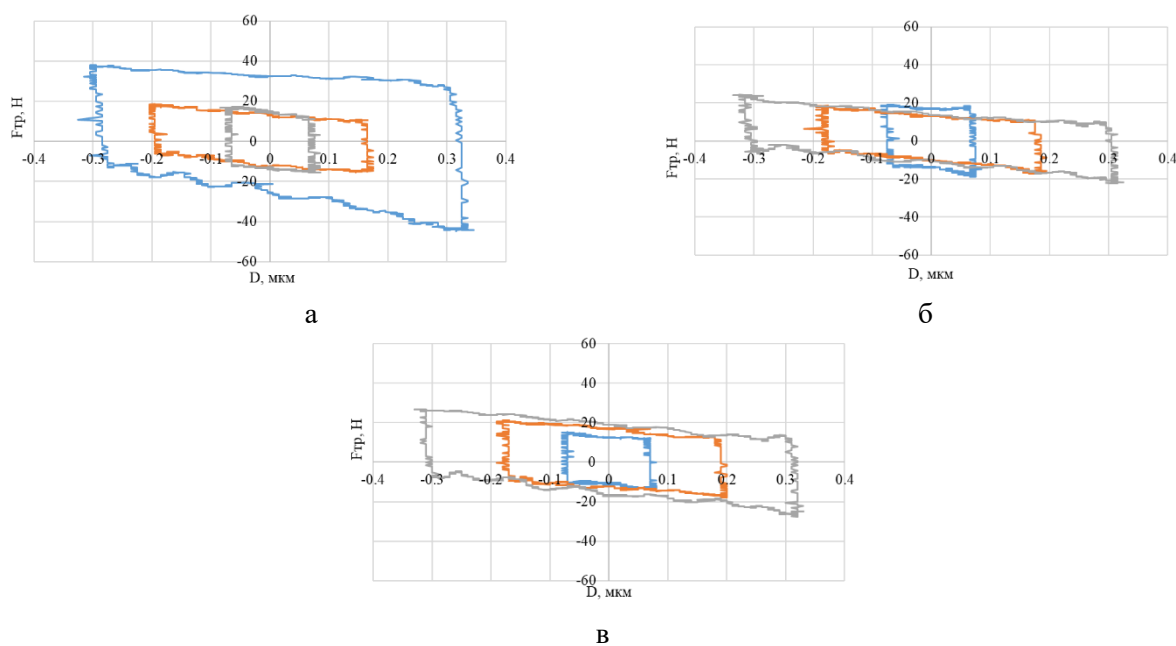


Рис. 4.48. Сравнение петель гистерезиса для покрытий: а – 1; б – 2; в – 3.

По параметрам испытаний, если первоначальная нагрузка остается постоянной, рассеиваемая энергия зависит в основном от амплитуды смещения, что наблюдается практически для всех трех покрытий (рис.4.48), кроме покрытия 1 с величиной перемещения 0,625 мкм. Различие в высоте петли объясняется разницей в значении коэффициента трения (рис.4.43) между покрытием 1 и покрытиями 2 и 3.

В результате суммирования энергии диссипации за каждый цикл ($Ed = \sum E_{di}$) и отнесением этой суммы к объёмному износу, был рассчитан энергетический коэффициент износа α ($\text{мм}^3/\text{Дж}$): $\alpha = W_v/Ed$. Измеренные и рассчитанные значения объёмного износа, энергии диссипации и энергетические коэффициенты объёмного износа приведены в Таблице 22 и на рис.4.49.

Таблица 22. Трибологические показатели покрытий

Пара трения	0,125 мм		0,325 мм		0,625 мм		$\alpha \cdot 10^{-5}$, $\text{мм}^3/\text{Дж}$
	W_v , мм^3	E_d , Дж	W_v , мм^3	E_d , Дж	W_v , мм^3	E_d , Дж	
1	0,01	43	0,033	136	0,168	422	45
2	0,02	40	0,035	94	0,0473	223	17,5
3	0,02	29	0,03	100	0,0308	220	5,71

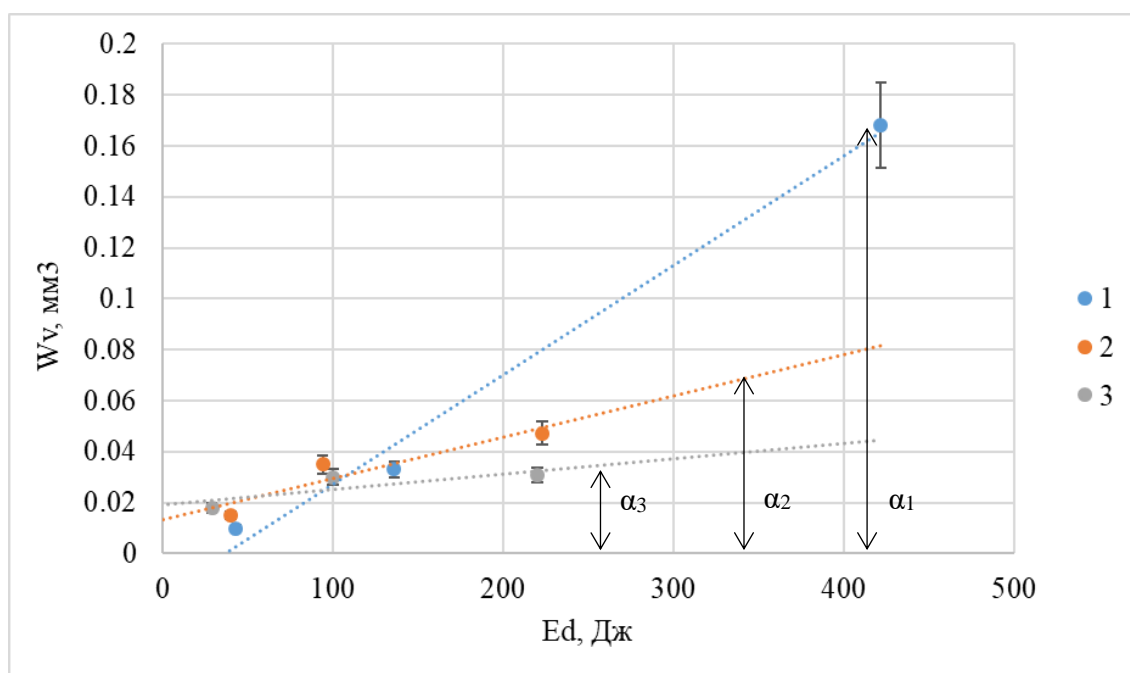


Рис.4.49. Коэффициент объемного износа покрытий в зависимости от энергии диссипации.

В соответствии с энергетическим подходом, в котором объем износа разрушенного материала связан с накоплением энергии диссипации в зоне контакта, анализ результатов дает общее линейное представление для трех пар трения, испытанных при трех амплитудах смещения, в котором величину объема изношенного материала W_v мы можем рассматривать как линейную функцию накопленной рассеиваемой энергии (рис.4.49.). По величине энергетического коэффициента объемного износа было установлено, что многослойное покрытие №3, содержащее коллоидный графит, обладает наилучшими трибологическими характеристиками при режиме возвратно-поступательного скольжения. Его износостойкость выше в 3 раза, по сравнению с покрытием №2, и выше в 7,5 раз по сравнению с покрытием №1.

4.5. Методика выбора ТСП, стойких к фреттинг-изнашиванию.

Проведенная работа позволяет на основе анализа результатов исследований фреттингостойкости ТСП, полученных в работе различными плазменными методами, разработать методику выбора ТСП, стойких к фреттинг-изнашиванию. Эта методика предлагается для узлов аэрокосмических компонентов, подвергающихся циклическим нагрузкам при вибрации, при которых вероятно взаимное относительное сдвиговое смещение внутри контактов трения (фреттинг).

Существование различных режимов фреттинга, включая полное заедание (схватывание), когда пары точек на всем протяжении контакта остаются в контакте при циклическом нагружении, частичное скольжение, когда некоторые точки остаются «прилипшими», а другие

подвергаются относительному скольжению, и полное проскальзывание, когда все точки контакта испытывают скольжение, приводят к увеличению сложности описания явлений фреттинг-изнашивания и фреттинг-усталости [114,115]. Поэтому разработка методики выбора ТСП, стойких к фреттинг-изнашиванию, может быть полезной для конструкторов и технологов. При этом данная методика может быть применена и для выбора износостойких ТСП.

Эта методика содержит следующие основные элементы:

- анализ повреждений от фреттинга и условий работы фреттинг контакта: среда, геометрия и материал контакта, нормальная сила в контакте P , температура, частота f , смещение D , количество циклов $N_{ц}$;
- технические требования, определяемые такими основными условиями работы фреттинг-контакта, как значения P , f , D , $N_{ц}$;
- анализ данных по материалам, конструкциям и методам формирования ТСП с оценкой параметров системы трибологического покрытия, применительно к условиям фреттинга;

Под системой трибологического покрытия, к которым относится ТСП, принято понимать комбинацию определенной подложки с определенным покрытием (при заданных условиях нагружения) в контакте трения с контртелом, как это показано на рис. 4.50 [116]. Оценку влияния параметров систем трибологических покрытий на различные механизмы изнашивания, в том числе при фреттинге, надо проводить исходя из анализа следующих основных элементов системы покрытия: контртела, покрытия, интерфейса между покрытием и подложкой, подложкой (поверхностью детали) и внешних условий нагружения на узел трения.



Рис.4.50. Система твердого смазочного покрытия

Так для контртела характерны такие основные параметры влияния, как твердость, шероховатость, напряжение сдвига поверхностного слоя и химический состав, и согласно результатам, приведенным в [117, 118], шероховатость контртела оказывает значительное влияние на абразивный износ контактирующей с ним подложки, и он тем больше, чем больше эта шероховатость. На адгезионный износ большее влияние оказывает твердость контртела, при этом износ меньше при контакте с контртелами с высокой твердостью.

Но больше всего параметров влияния у покрытий, и основная доля этих параметров оказывает воздействие на адгезионный износ. Так, известно, что твердость покрытия подчиняется модели Арчарда [119] и существует линейная зависимость между объемом износа и обратной величиной твердости. Высокая твердость покрытия обеспечивает, как правило, его хорошую износостойкость. При использовании тонкого покрытия, нагрузка в основном переносится на подложку, и уже ее твердость обеспечивает высокую износостойкость системы покрытия [119].

При использовании покрытий важно оценить степень несоответствия модулей упругости E между покрытиями и подложкой. В частности, твердые покрытия обладают, как правило, более высокими значениями модуля упругости чем подложки и при больших деформациях подложек под действием больших нагрузок, покрытия трескаются, не выдерживая износа. Несоответствие модулей упругости покрытия и подложки является важнейшим параметром, особенно сильно влияющим на величину ударного износа [120].

В работе [121] установлено, что несмотря на то, что, как считали долго, твердость материала определяет его износостойкость, отношение твердости (H) и модуля упругости (E) является более подходящим параметром для предсказания износостойкости и особенно для материалов с покрытиями. Этот показатель включает в себя такие критерии эффективности в оценке износа, как упругая деформация до разрушения, критическое давление текучести для пластической деформации и вязкость разрушения. Основным смыслом введения этого индикатора H/E состоит в том, что не следует стремиться к большей твердости за счет значительного эластичного несоответствия свойств между покрытием и подложкой, так как в случае использования твердых покрытий это ограничит их практическую применимость.

Вязкость разрушения—очень важный показатель при усталостном разрушении, износе и эрозии покрытий. В работе [122] показано, что прочность покрытия пропорциональна сопротивлению распространению трещин от царапин.

Основной характеристикой интерфейса между покрытием и подложкой является адгезия, прочность сцепления. Эта характеристика зависит от механизма взаимодействия наносимого материала покрытия с подложкой, появляющиеся при этом внутренние напряжения

определяются такими факторами, как химический состав покрытия, материал подложки, способ и параметры нанесения, предварительная обработка поверхности подложки и толщина покрытия.

Микроструктура (пористость, размер и форма зерна) так же во многом определяет трибологические характеристики покрытия, его твердость и износостойкость. Эволюция микроструктуры сильно зависит от параметров осаждения покрытий. Так, согласно [123], при использовании PVD технологий она зависит от давления газа, температуры осаждения и напряжения смещения на подложке. При высоком напряжении смещения покрытие имеет зернистую структуру, при меньшем напряжении покрытия имеет столбчатую структуру. Свои особенности имеют и другие методы осаждения покрытий.

Толщина покрытия определяется условиями эксплуатации, т.е. если есть повышенный и возрастающий износ, то покрытие должно быть более толстым. Но чаще всего для большинства покрытий определяется оптимальная толщина, обеспечивающая требуемое время износостойкости [124].

Среди группы параметров, имеющих отношение к условиям нагружения, эксплуатации покрытий можно выделить основные: нормальная нагрузка (контактное давление), скорость скольжения и среда эксплуатации. Очевидно, что при нормальных условиях износ увеличивается с увеличением нагрузки, только при этом следует учитывать, что по-видимому более важным показателем для анализа износостойкости является контактное давление, а не нормальная нагрузка. В настоящее время принято представлять результаты трибологических исследований, как отмечалось выше, в виде карт износа, отражающих на плоскости различные режимы поведения трибосистемы в зависимости от нагрузочно–скоростных параметров испытаний.

Выбор и применение покрытий для конкретных условий эксплуатации являются важными и эффективными шагами снижения трения и защиты контактирующих поверхностей от фреттинг-износа. В последние десятилетия разработано много новых методов осаждения покрытий и новых составов и композиций на основе твердых смазочных материалов [125], однако из-за отсутствия системного подхода к выбору трибологических покрытий выбор оптимального покрытия для требуемых условий эксплуатации всё ещё затруднен [116].

Трибологические характеристики покрытия не являются одним из его внутренних свойств, а зависят от всей системы включая параметры аналога покрытия (если он есть), подложки, контртела, условий нанесения и окружающей среды.

Согласно этого анализа, трудности выбора оптимального покрытия связаны с:

- влиянием различных параметров на трибологические характеристики;
- оценкой механизмов изнашивания, при этом считается, что идентификация этих механизмов является одним из важнейших факторов выбора покрытия;

– возможностью использования и поиском покрытия-прототипа, что не всегда информативно для нужных условий эксплуатации.

Так по данным [126] были рассмотрены около 800 различных DLC покрытий, относящихся к разным ситуациям и имеющих совершенно разные трибологические характеристики.

Поэтому процесс выбора покрытия для нового приложения должен состоять из двух этапов: первый этап – это предварительный отбор, т. е. выбор нескольких кандидатных покрытий в соответствии с техническими требованиями с оценкой их характеристик и процессов осаждения; второй этап – это экспериментальная оценка возможных покрытий и обоснованный выбор лучшего. Предварительный подбор покрытий, подбор нескольких покрытий из большого числа возможных – сложная работа, поэтому лучше использовать в этом случае экспертные системы, базы данных или информационные системы (обзоры).

Следующим важным моментом анализа этого процесса выбора покрытия является формирование требований. Требования трибологического характера выполняют, в основном, два аспекта: снижение трения и повышение фреттинго-стойкости (долговечности). В большинстве случаев требуется покрытие с низким коэффициентом трения, поскольку с таким покрытием можно снизить потребление энергии и фрикционную нагрузку и тем самым обеспечить низкий фреттинг-износ. К нетрибологическим требованиям и характеристикам покрытий относятся такие функциональные требования, как коррозионная стойкость, тепловые характеристики и т. п. Нефункциональные требования, это низкая стоимость, эффективность нанесения, цвет и др.

Другим важным моментом является анализ контакта и механизма износа, повреждений покрытия, который необходимо проводить на основе формирования и анализа известных условий применения покрытия. Попытка представить обобщенную концепцию моделей трения с покрытиями на основе описания моделей трения покрытий при сухих контактах скольжения, что в основном характерно для ТСП, дана в работе [127]. Процесс трибологического контакта при относительном движении тел очень сложен, поскольку вовлекает одновременно несколько моделей механического трения и износа как на микро-, так и на макро-уровнях, также, как и модели трибохимического взаимодействия и переноса материала.

Макромеханические трибологические модели описывают распределения напряжений и деформаций целого контакта, общие пластические и упругие деформации, а также весь процесс образования частиц (дебризов) продуктов износа и его динамику. Эти явления типичны для размеров от 1 мкм до 1 мм. Микромеханические трибологические модели описывают напряжения и деформации на уровне шероховатости поверхности, образование и распространение трещин, расслоение вещества и образования единичных частиц. Для типичных

контактов эти явления характерны для уровня размера около 1 мкм и менее до размеров нанометра.

В микромасштабе имеют место и химические взаимодействия, составляющие основу трибохимических моделей. Перенос вещества имеет место как на макро-, так и на микро-уровнях, но главным образом на трение и износ влияет макроперенос вещества.

Анализ ТСП, используемых для повышения фреттингстойкости и близких по условиям эксплуатации к двигателям и энергоустановкам летательных аппаратов [11] показал, что трибологическое поведение таких покрытий определяется их конструкцией, и проектирование ТСП должно осуществляться с учетом условий их работы, обоснованно выбранных материалов, входящих в состав покрытия, и технологии их формирования, как это показано на схеме рис.4.51.

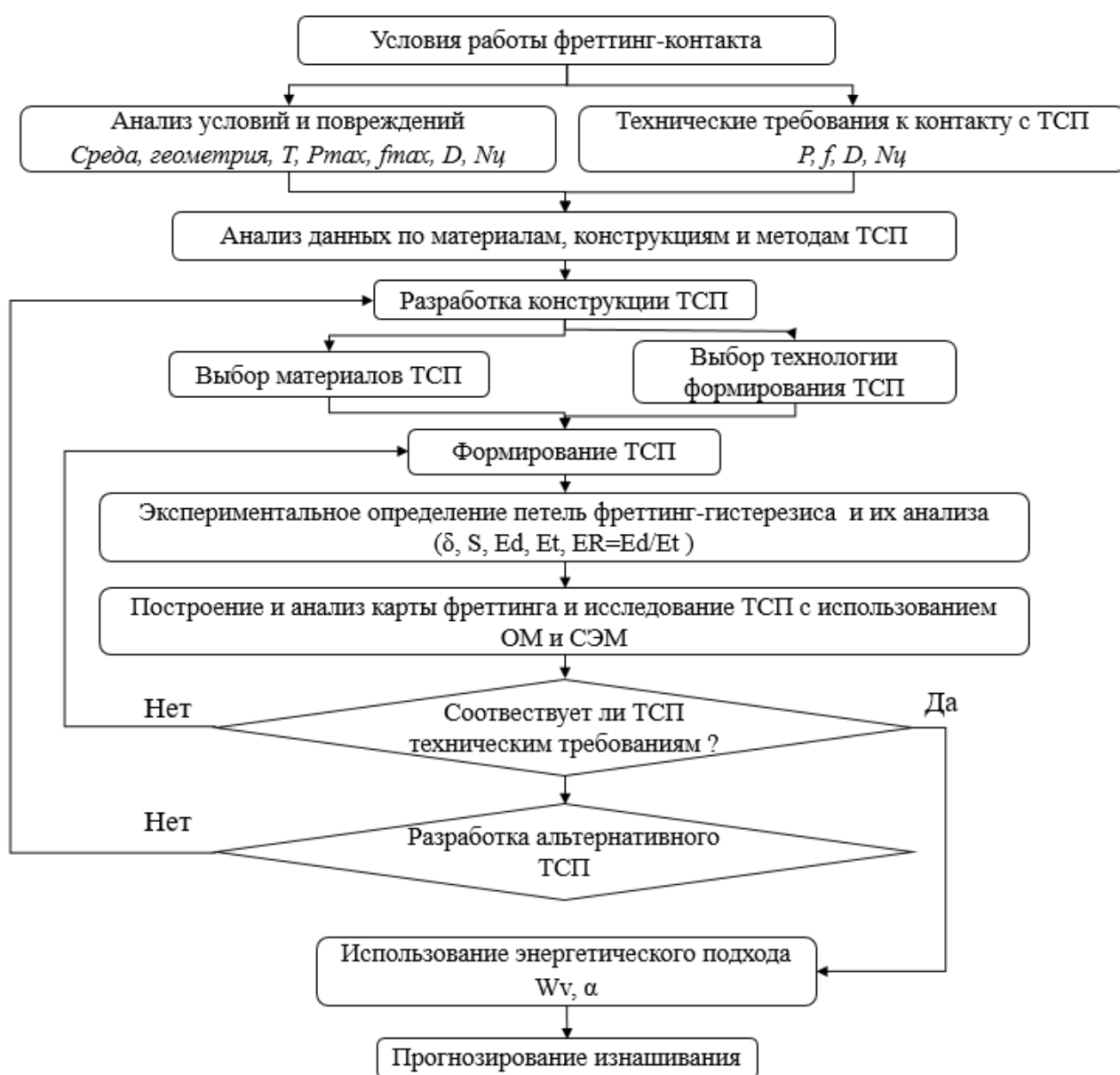


Рис.4. 51. Методика выбора ТСП, стойких к фреттинг-изнашиванию.

Проведенный в настоящей работе анализ получения, использования и применения ТСП, сформированных для повышения фреттингостойкости узлов трения авиационных и ракетно-космических двигателей и энергоустановок, показал, что трибологическое поведение ТСП для заданных условий эксплуатации и их свойства определяются не только материалами (компонентами, входящими в их состав), используемыми для их формирования, но и, в значительной степени, конструкцией ТСП, формируемых, в частности, перспективными методами плазменных технологий.

Построение карт процесса фреттинга с использованием экспериментально получаемых петель фреттинг-гистерезиса и энергетического подхода к анализу процесса (раздел 2.1.1) позволяет эффективно определить режимы фреттинга ТСП и механизмов их изнашивания. Оценка коэффициента s , индекса δ скольжения (раздел 2.2) и величины ER позволяет оперативно определять режимы трения фреттинга и особенно границы перехода между этими режимами.

Завершается эта методика прогнозированием фреттинг-изнашивания ТСП (раздел 2.1.4) с определением измеренного объемного изоса материала покрытия в пятне износа Wv , мкм^3 к суммарной энергии трения по всем циклам фреттинга N_{Σ} .

ГЛАВА 5. ПРАКТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

5.1. Результаты использования ТСП, полученных плазменным напылением, для замковых соединений вентиляторных лопаток ГТД

Настоящий раздел работы был посвящен проведению сравнительных испытаний антифреттинговых покрытий МАИ NiAl- CuNiIn- Ni[Cg] на титановых образцах, для чего было изготовлено 30 образцов из материала хвостовика рабочих лопаток вентилятора, титановый сплав ВТ6. Испытания на фреттингостойкость были проведены при следующих условиях нагружения:

- контактные напряжения в контакте – 300 кгс/ см²;
- частота колебаний образцов – 10 Гц;
- температура испытаний от 20 °С до 30 °С.
- относительное перемещение при фреттинге – 200 мкм;
- временные базы испытаний ~ 15 мин и ~ 15 часов;
- материалы контртела ВТ-6 без покрытия;
- образец, титановый образец с ТСП;
- реализуемый тип контакта: цилиндр – цилиндр;
- вид движения –возвратно-поступательное.

Покрытия, разработанные в МАИ, имели три модификации: первая модификация состояла из трех слоев NiAl- CuNiIn и Ni[Cg]; во второй был дополнительно нанесен слой Molykote 106 (близкий аналог французского Molydag 254 - лак на основе эпоксидного полимера, содержащего наночастицы MoS₂), а в третьей, помимо слоя Molykote 106 слой Ni[Cg] был дополнительно пропитан раствором коллоидного графита.

Для выполнения этого технического задания компании АО «ОДК-Авиадвигатель» была существенно модернизирована машина трения 3308 МАИ, моделирующая сопряжение замок вентиляторной лопатки/ диск, принципиальная схема нагружения которого показана на рис.5.1.

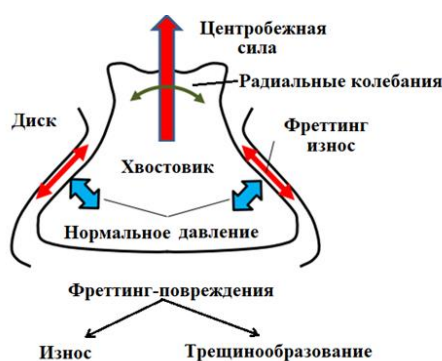
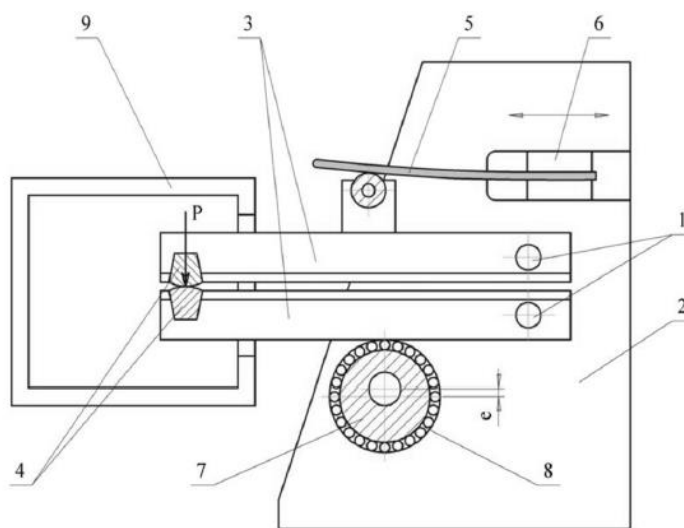


Рис.5.1. Схема хвостовика вентиляторной лопатки.

Использованная ранее схема машины трения 3308 была спроектирована и изготовлена при технической поддержке компании Snesta, Франция, в соответствии со схемой, показанной на рис.5.2.



- 1 – оси рычагов; 2 – плиты корпуса установки; 3 – рычаги;
 4 – испытуемые образцы; 5 – плоская пружина; 6 – узел перемещения пружины; 7 – вал; 8 – внешняя обойма подшипника; 9 – объем моделирования среды трения

Рис.5.2. Схема машины сухого знакопеременного трения

На осях 1, закрепленных между двумя стойками 2 корпуса установки, размещены два рычага 3, на конце которых в специальных гнездах крепятся испытуемые образцы 4. Под действием плоской листовой пружины 5 с помощью узла ее перемещения 6 между образцами 4 образуется контакт трения с усилием P , которое может изменяться при использовании листовых пружин разной толщины. Возвратно-поступательное движение образцов 4 друг относительно друга обеспечивается при вращении вала 7, закрепленном с эксцентриситетом « e », при этом внешняя обойма подшипников 8 находятся в постоянном контакте с нижним рычагом. Внешние концы рычагов 3, вместе с образцами 4 могут размещаться в объеме 9, в котором создается требуемая по условиям эксплуатации внешняя среда и температурные условия трения.

На рис.5.3. представлен чертеж тестовых образцов, которые жестко закрепляются с помощью цанговых зажимов в специальных гнездах машины трения. На контактные поверхности образцов наносятся опытные исследуемые покрытия. Машина трения позволяет обеспечить следующие условия испытаний на фреттинг-износ: давление в контакте до 1 ГПа, частота до 50 Гц, амплитуда от 0,1 до 2 мм, температура среды от 20 до 600°С. Величина износа определялась по измерению хорды износа на цилиндрической контактной поверхности образца.

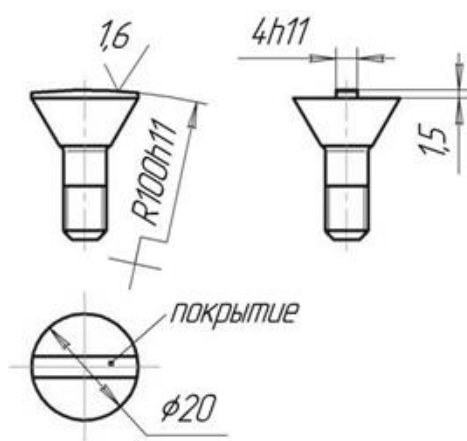
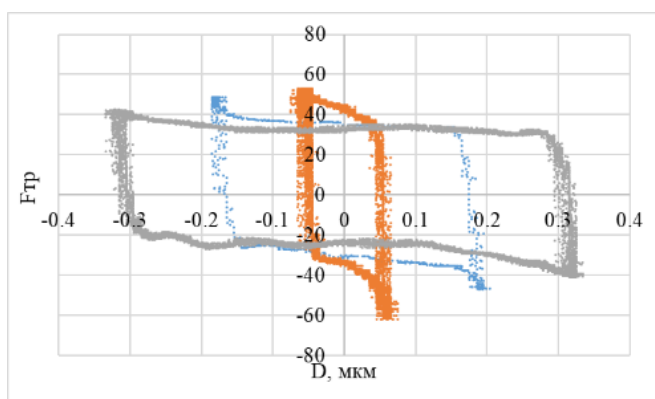


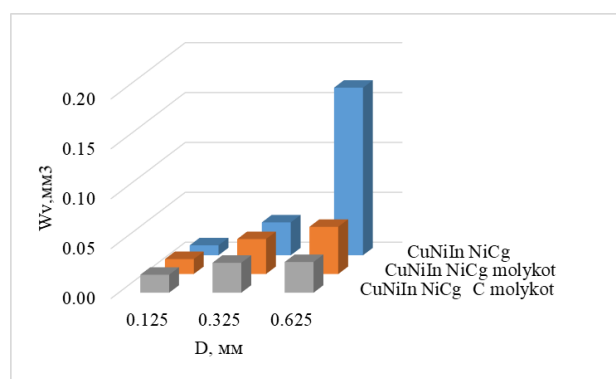
Рис.5.3. Тестовый образец.

Модернизированная машина трения 3308 детально описана в разделе 3.4.

Типичные петли фреттинг-гистерезиса для величин смещения 0, 125 мкм, 0,325 мкм и 0,625 мкм и соответствующим им значениям величин объемного износа W_v , мм³ трех ТСП, полученных методом атмосферного плазменного напыления, представлены на рис. 5.4 а и 5.4. б, соответственно.



а)



б)

Рис. 5.4. Петли фреттинг-гистерезиса для трех величин смещения (а) и значения величин объемного износа (б) W_v , мм³ разработанных ТСП.

На основании полученных результатов исследований по материалам и конструкции ТСП в ООО «ТСЗП» переданы реальные хвостовики вентиляторных лопаток для отработки технологии нанесения равномерного многослойного ТСП на поверхность хвостовика. После отработки технологии покрытие формировалось непосредственно на хвостовике вентиляторной лопатки (рис. 5.5).



Рис. 5.5. Вентиляторная лопатка на установке атмосферного плазменного пыления.

По результатам проведенных испытаний были сделаны следующие выводы и рекомендации:

- включение в состав композиционного покрытия полимерного твердого смазочного покрытий типа Molykot 106 с дисульфидом молибдена положительно влияет на работоспособность и фреттингостойкость всех исследованных пар трения: плазменно-напыленное покрытие/ титановый сплав ВТ6;
- все три модификации покрытия МАИ показали хорошие антифреттинговые свойства.

По результатам полученных данных покрытия МАИ и его модификации рекомендованы для испытаний в штатных условиях эксплуатации вентиляторной лопатки на технологическом двигателе.

5.2. Применение и сравнительный анализ конструкционных противоизносных материалов и ТСП для защиты от износа узлов поворота лопаток направляющего аппарата компрессора ГТД

Настоящая работа была выполнена в рамках договора каф. 205 МАИ с ОКБ им. А.Люльки, филиал ПАО «ОДК-УМПО» и в соответствии с техническим заданием объектом исследования являлся поворотный узел направляющего аппарата компрессора низкого давления (НА КНД) 1-й ступени. Известно [131], что в узлах трения поворотных лопаток компрессоров турбомашин используются подшипники скольжения, представляющие собой возвратно-вращательные (реверсивные) циклически работающие пары трения, как это показано на рис.5.6.

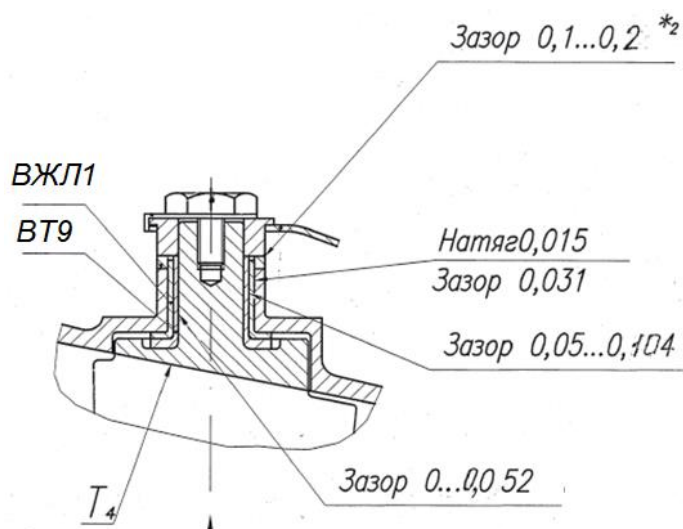


Рис.5.6. Принципиальная схема работы пары трения.

Сила, нагружающая подшипник рассматриваемой пары трения, это равнодействующая аэродинамических сил, приложенных к профилю лопатки направляющего аппарата. Поскольку вектор направления данной силы при повороте лопатки также поворачивается, то область максимальных контактных давлений перемещается по поверхности втулок в пределах узла поворота ($\pm 30^\circ$). Для оси (вала) место приложения максимальных контактных давлений при повороте не изменяется и определяет направление приложения подъемной силы на профиле лопатки.

Как показал проведенный анализ, подшипниковый узел в рассматриваемой паре трения лучше всего реализовать с использованием двух втулок, из которых внутренняя втулка плотно закреплена на оси (может быть сменной что крайне выгодно с точки зрения эксплуатации) и в рассматриваемой паре трения «вал-втулка» выполняет роль вала. Использование подобных втулок упрощает размерную обработку корпуса и представляет возможность использования различных материалов при создании пары трения, не изменяя при этом технологию изготовления

корпуса компрессора. Чертеж втулок и расчетная схема нагружения представлены на рис.5.7 и 5.8, соответственно. Перечень исследуемых материалов представлен в Таблице 23.

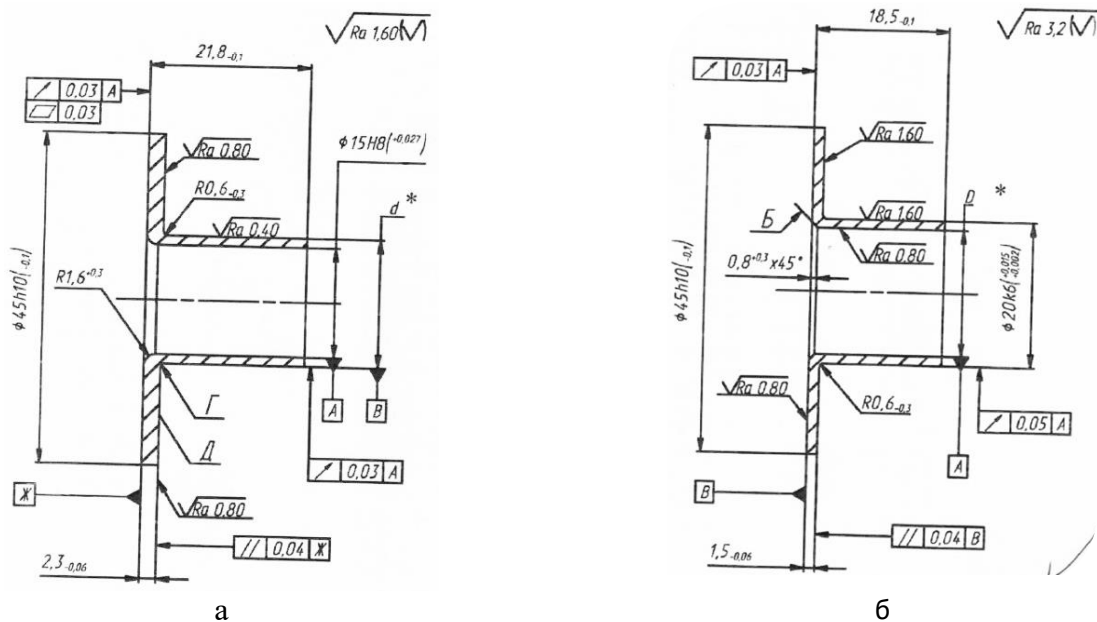


Рис.5.10. Детали образцы пар трения Втулка внутренняя ВТ9 (а) и Внешняя втулка ВЖЛ 1(б)

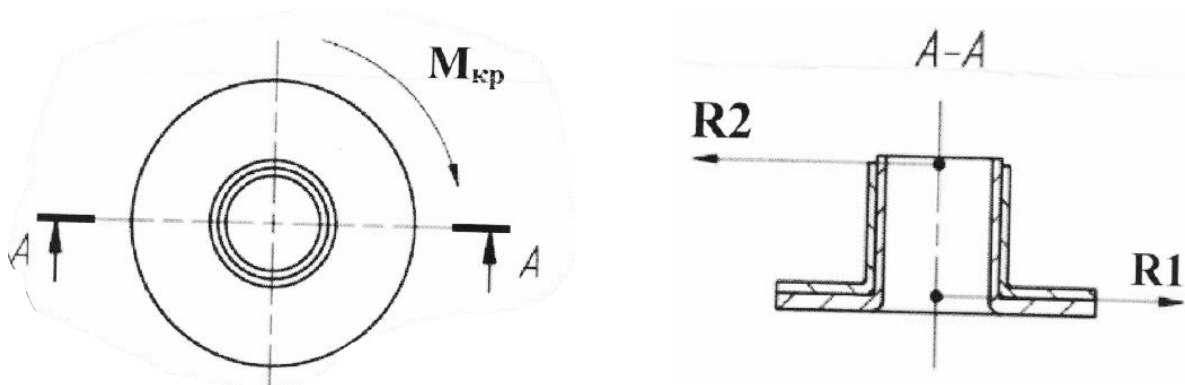


Рис.5.11. Расчетная схема нагружения

Таблица 23. Перечень противоизносных сплавов и образцов в парах трения

Пара трения	Образец (Внутренняя втулка)	Образец (Внешняя втулка)	Изготовитель
1.	ВТ 9 (альфированный)	NiTi-TiC	НИИД
2.	ВТ 9 (альфированный)	ВНС 32	ОКБ А.Люльки
3.	ВТ 9 (альфированный)	ВЖЛ 2	ОКБ А.Люльки
4.	NiTi-TiC	NiTi-TiC	НИИД
5.	ВТ 9 (альфированный)	ВЖЛ 1 (С1)	ОКБ А.Люльки
6.	ВТ 9 (Mo+MoS ₂)	ВЖЛ 1 (С1)	МАИ-ТСТ
7.	ВТ 9 (Ni[Cg]+MoS ₂)	ВЖЛ 1 (С1)	МАИ
8.	ВТ 9 (TiN-Pb)	ВЖЛ 1 (Mo)	МАИ-ТСТ
9.	ВТ9 (Modengy)	ВЖЛ 1 (Mo)	ОКБ А.Люльки - ТСТ

Исследования были проведены в условиях лаборатории на машине трения каф.205 МАИ №3308 при испытаниях на фреттинг-износ модельных образцов в возвратно-поступательном режиме при следующих условиях нагружения:

- нормальная нагрузка - 30Н;
- частота - 5 Гц;
- величина перемещения - 2мм;
- время непрерывных испытаний - 33 минуты.

Величина износа определялась по изменению массы образцов, измеренной перед началом испытаний и после испытаний.

Результаты сравнения весового износа перечисленных в таблице 23 пар трения представлены на рис.5.9.

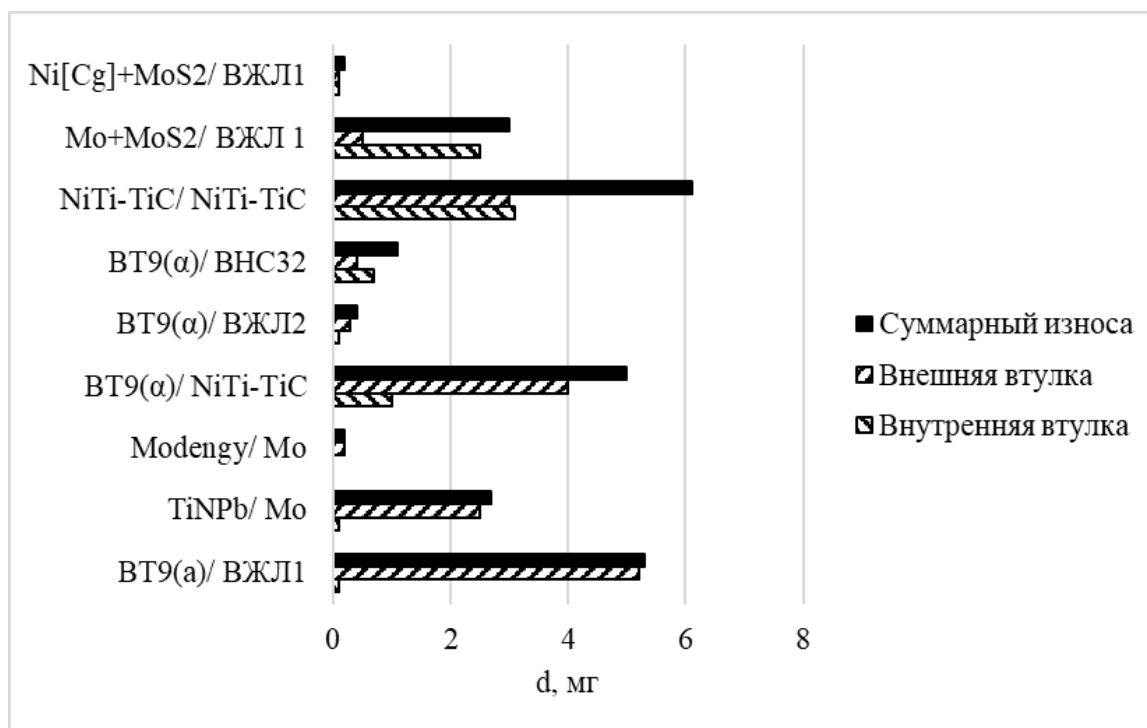


Рис.5.9. Сравнение весового износа образцов пар трения.

На основе проведенных испытаний было установлено, что:

- никелевый сплав ВЖЛ 2 и сталь ВНС 32 в паре с альфированным титановым сплавом BT 9 (альфированный) показало значительное улучшение износостойкости по сравнению со штатной парой BT9 (альфированный)/ ВЖЛ 1 в 10 и 4 раза, соответственно;
- опробованный в паре трения BT 9 (альфированный)/ NiTi-TiC износостойкий материал как NiTi-TiC продемонстрировал незначительное повышение износостойкости, а в паре трения NiTi-TiC/NiTi-TiC показатель износостойкости ухудшился значительно по

сравнению со штатной парой;

- применение системы покрытий ВТ9 (TiN-Pb)/ ВЖЛ 1(Мо) позволило уменьшить суммарный износ в 2 раза по сравнению со штатной парой трения ВТ9 (альфированный)/ ВЖЛ 1.
- из трех использованных материалов покрытий Ni[Cg]+MoS₂, Mo+MoS₂ и Modengy на титановом сплаве ВТ9 наилучшее значение по износостойкости продемонстрировала пара трения Ni[Cg]+MoS₂/ВЖЛ 1, величина износа которого в 10 раз меньше по сравнению со штатной парой ВТ9 (альфированный)/ ВЖЛ 1, поэтому оно рекомендуется для дальнейших испытаний в условиях реального поворотного узла;
- по сравнению с парой ВТ9 (Modengy)/ВЖЛ 1(Мо) пара трения Ni[Cg]+MoS₂/ВЖЛ 1 предпочтительней, т.к. напыление на внутреннюю поверхность втулки методом плазменного атмосферного напыления вызывает ряд технологических сложностей;

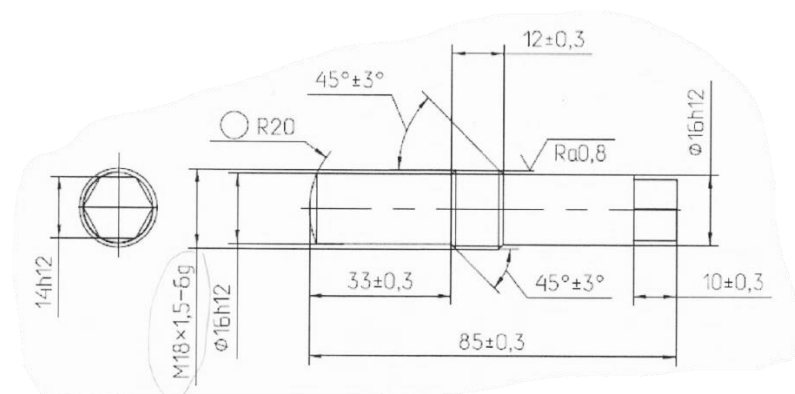
Полученные результаты исследований были использованы в поисковых исследованиях ОКБ им. А.Люльки филиал ПАО «ОДК-УМПО» (Приложение 2) и разработке рекомендаций по использованию «толстых» плазменных покрытий наилучших составов для защиты от износа и фреттинг-износа рабочих поверхностей поворотных узлов направляющего аппарата компрессора низкого давления ГТД.

5.3. Опытный технологический процесс и результаты применения МДО покрытий для защиты от заедания (схватывания) резьбовых соединений элементов системы обеспечения теплового режима (СОТР) космического аппарата (КА)

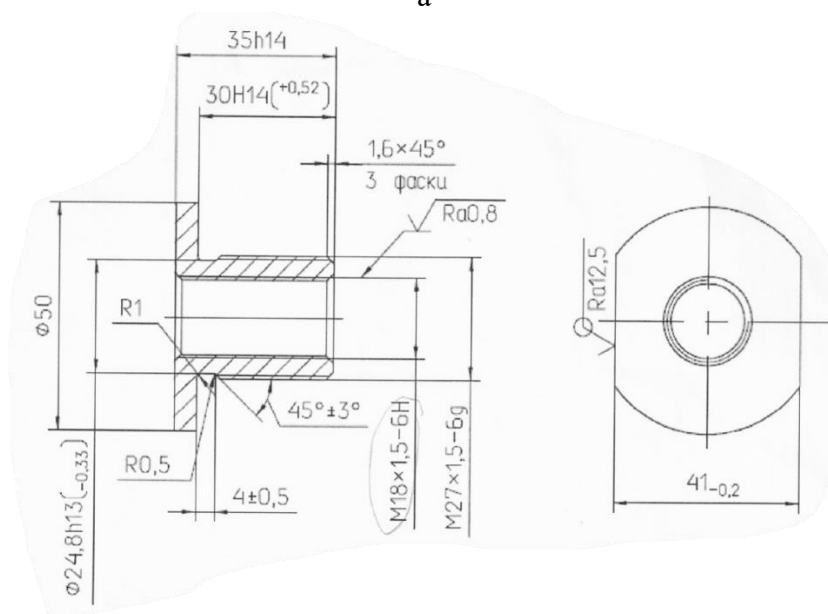
По просьбе отделения систем терморегулирования космического аппарата (КА) предприятия ПАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева при разработке мероприятий по снижению первоначального усилия трения при запуске в рабочей среде «аммиак» электромеханических агрегатов системы обеспечения теплового режима (СОТР) КА, в том числе электронасосного агрегата, в том числе электронасосного агрегата с гидростатическим подвесом ротора выполнена эта работа.

Представленные детали (рис.5.10.) после нанесения антифрикционного покрытия предназначены для использования для проверки усилия, прилагаемого при соединении на установке (рис.5.11.) резьб вручную. Проблема проявилась при проведении на борту международной космической станции (МКС) плановых замен малоресурсного оборудования – насосов системы терморегулирования. Космонавтам в невесомости оказалось тяжело стыковать

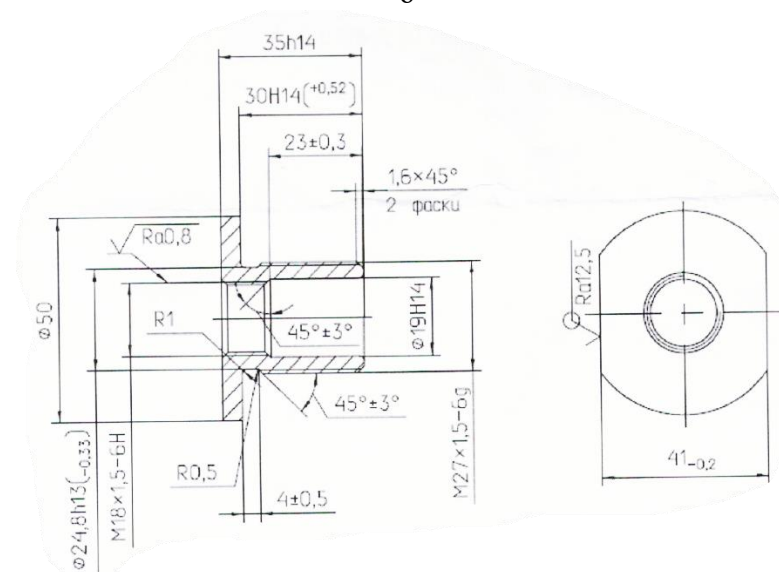
и затягивать гидравлические разъемы с этими резьбами, поскольку выбрано не очень удобное место размещения заменяемого агрегата. Кроме того, резьбы постоянно закусывало.



а



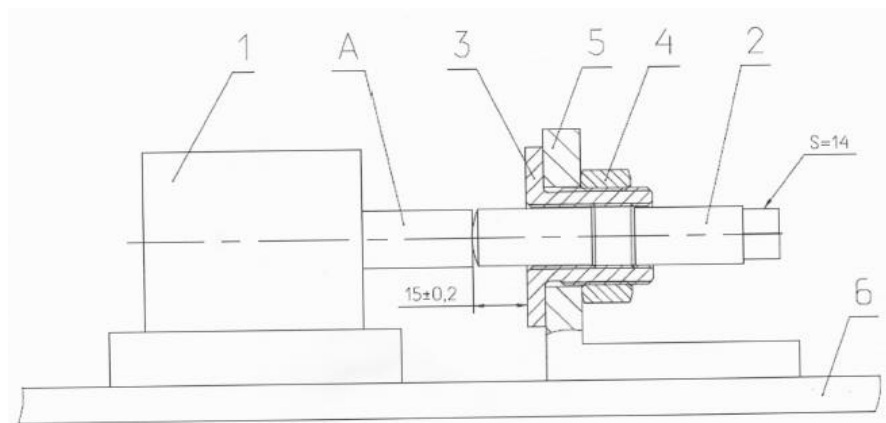
б



в

Рис.5.10. Детали с резьбой:

а- болт; б – гайка ходовая ; в - гайка ходовая с короткой резьбой



1 - пневмоцилиндр, 2 – болт, 3 – гайка ходовая, 4 – контргайка (гайка крепления), 5 – кронштейн, 6 - основание

Рис.5.11. Схема установки болт – гайка

Детали с резьбой эксплуатируются в атмосферном воздухе при комфортных для человека температуре ($15...30^{\circ}\text{C}$) и влажности ($30...80\%$). Количество циклов стыковки – расстыковки включая наземные подготовительные работы, никогда не больше 50, материал резьбовой пары – АМг-6.

Нагрузка на контакт трения соответствует соединению резьб от руки, без инструмента. На гидроразъемах на цилиндрические поверхности гаек дополнительно наносится накатка.

Скорость стыковки – соответствует соединению от руки, т.е. не быстрее 1-го оборота за 4 секунды. Форма движения – соединение резьб, т.е. скольжение по окружности с поступательным движением.

Был разработан и реализован процесс МДО для защиты резьб (покрытие одновременно наносится на все поверхности деталей) при следующих базовых параметрах: плотность тока $j=10 \text{ А/дм}^2$, время нанесения $t=180 \text{ мин}$, температура электролита $T=25^{\circ}\text{C}$ и состав электролита КОН- 1 г/л, Na_2SiO_3 - 6 г/л. Болт и гайка с сформированным МДО покрытием представлены на рис.5.12.



а



б

Рис.5.12. Болт (а) и гайка (б) с МДО

На оптическом микроскопе была сделана оценка толщины покрытия, которая показала, что толщина керамического покрытия с технологическим слоем («шубой») составляет около 78 мкм, и до 120 мкм (во впадинах резьбы), при толщине основного слоя, сформированного в теле материала от 48 до 52 мкм, при сохранении номинальных размеров детали (рис.5.13).

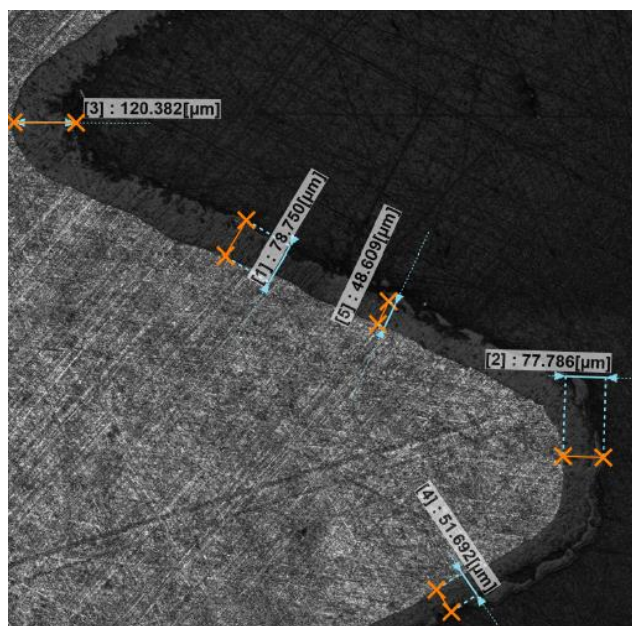


Рис.5.13. Толщина керамического покрытия.

Оценка полученного покрытия позволила сделать следующие рекомендации:

- необходимость удаления внешнего рыхлого (технологического) слоя методом шлифования резьбы или многократной технологической приработкой;
- в дальнейшем выполнять ходовую резьбу трапецеидальной формы с высокой точностью;
- МДО покрытие формировать на обоих деталях резьбовой пары;
- продолжить работу по отработке режимов МДО с целью уменьшения толщины рыхлого (технологического слоя).

Таким образом, по заключению Акта об использовании результатов (Приложение 3) этих исследований, полученного от ПАО РКК «Энергия», керамикоподобные покрытия после отработки технологии контролируемого удаления внешнего (технологического) рыхлого слоя могут быть рекомендованы к использованию в малой- и средненагруженной парах трения, в том числе работающих в средах с низким смазывающим эффектом.

5.4.Опытный технологический процесс и технологическая оснастка формирования МДО покрытия на внутреннюю поверхность теплового насоса малого диаметра в СОТР КА.

Из АО ГНЦ «Центр Келдыша» на каф.205 МАИ были переданы для нанесения износостойкого покрытия корпуса капиллярных насосов контурной тепловой трубы (КТТ). Ее назначение – сбор и передача тепловой энергии от одного элемента КА другому или передача избыточного тепла на радиатор-излучатель для последующего сброса в холодное космическое пространство.

Прессованная деталь из пористого никеля, формируемая внутри трубы, и есть капиллярный насос (фитиль). Рабочее тело – аммиак особой чистоты или пропилен, иногда применяют толуол.

Фитиль подает жидкое рабочее тело в зону тепловыделения, где происходит его нагрев и испарение с последующим отводом пара под действием перепада давления (это не более 200 ...400 мм.вод.ст.) к радиатору-охладителю. Зона испарения может совпадать с зоной установки фитиля.

Передаваемая тепловая мощность от 10 до 150 Вт в зависимости от свойств фитиля-капиллярного насоса. Рабочие температуры – ориентировочно от минус 10 до плюс 700 °С. Все устройство работает без электрических побудителей движения рабочего тела. Движущие силы – капиллярная и перепады давления, вызванные изменениями температуры и фазового состояния рабочего тела.

Контурная тепловая труба – это герметичное устройство, представляющее собой автономный двухфазный контур с капиллярной подачей рабочего тела, имеющий в своем составе место подвода тепла (испаритель), место отвода тепла (конденсатор) и резервные органы управления, представленные термоэлектрическим модулем холодильным и двумя электронагревателями испарителя, как это показано на рис.5.14.

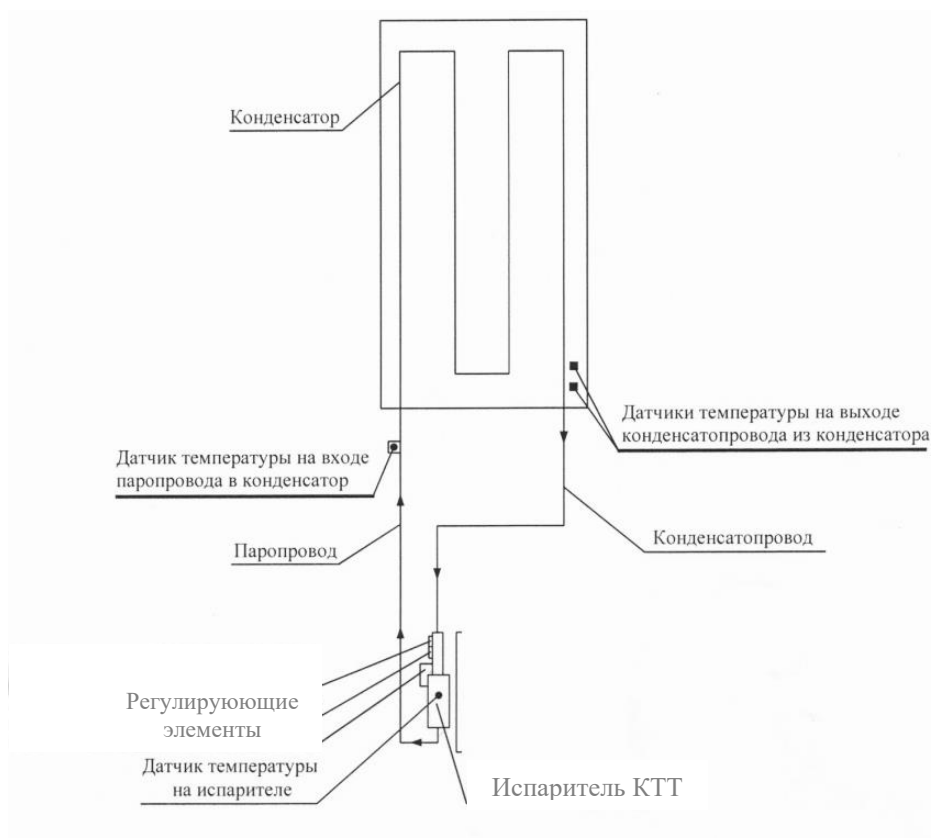


Рис.5.16. Структура радиатора с контурной тепловой трубой

В состав КТТ входит:

- испаритель из пористого материала со средним размером пор приблизительно 1 мкм с продольными пароотводными каналами, корпус испарителя с поперечными пароотводящими каналами изготавливают из нержавеющей стали, основание испарителя, имеющее контактные поверхности и отверстия для крепления испарителя к охлаждаемой поверхности, выполняемой из теплопроводящего материала;
- компенсационная полость на входе в испаритель, обеспечивающая гарантированную подачу жидкой фазы теплоносителя в испаритель и компенсацию изменения ее объема в КТТ в процессе работы, компенсационная полость изготавливается в виде цилиндра из нержавеющей стали со специальной капиллярной структурой;
- паропровод, изготовленный в виде тонкостенной трубки из нержавеющей стали, служащий каналом для транспортировки пара от испарителя к конденсатору;
- конденсаторопровод, изготовленный из тонкостенной нержавеющей трубки, служащей для транспортировки жидкого теплоносителя от конденсатора к испарителю;
- конденсатор, изготовленный из алюминиевого сплава и служащий для передачи тепла излучающей поверхности и конденсации паров теплоносителя.

Принцип работы КТТ основан на использовании фазовых превращений теплоносителя (испарение ↔ конденсация). Тепло поступает в испаритель КТТ и расходуется на испарение рабочей жидкости. Образовавшийся пар поступает через паропровод в конденсатор, где конденсируется. Выделяемое при конденсации тепло отводится в окружающую среду посредством излучения с панелей-радиаторов.

Движение теплоносителя в КТТ осуществляется под действием перепада давления, создаваемого капиллярным насосом испарителя. Капиллярный насос испарителя представляет собой пористую структуру с размером пор приблизительно 1 мкм, которая за счет капиллярных сил обеспечивает подачу сконденсировавшегося теплоносителя в испаритель. Конструктивно капиллярный насос и испаритель выполнены в виде единого блока. КТТ могут работать в земных условиях при произвольном расположении конденсатора и испарителя относительно друг друга. После запуска КТТ радиатор штатно работает в течение всего времени эксплуатации КА.

Задача настоящей работы – нанесение разделительного износостойкого слоя Al_2O_3 на внутреннюю цилиндрическую поверхность ($\varnothing 10$ мм, длина 81 мм) заготовки из сплава АД1 (20x60x81 мм) для обеспечения процесса электроимпульсного спекания карбонильного порошка никеля с солью (NaCl, используемый в качестве наполнителя пор, обеспечивал пористость $P=65\%$). Условия и элементы прессования - пневмоцилиндром (диаметр штока 200 мм, давление 0,8 МПа, диаметр молибденовых пуансонов-электродов 10 мм) с энергией 18,8 кДж (при напряжении 14 кВ). Заготовка заключена в армирующий «колодец» из брусков закаленной стали, соединенных шпильками (рис.5.15).

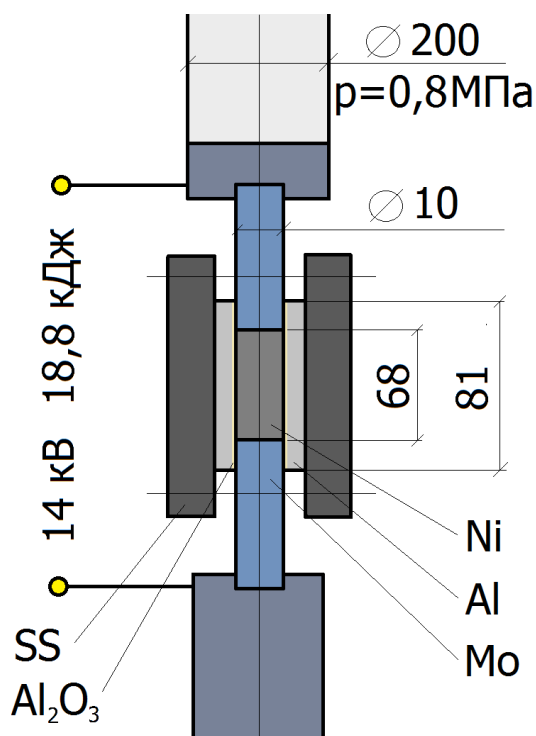
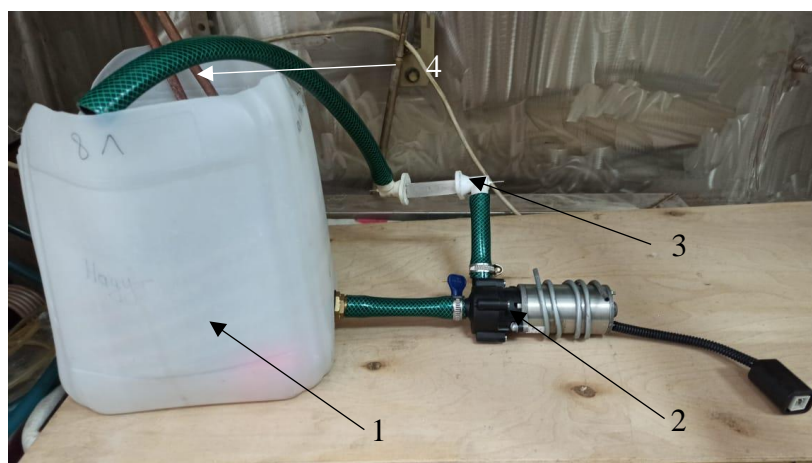


Рис.5.15. Схема прессования капилляра КТТ.

С учетом опыта предыдущих исследований по формированию МДО покрытий на внутренней поверхности трубчатых изделий [132,133] для получения керамического покрытия на внутренней поверхности корпуса капиллярного насоса (рис.5.16) был изготовлен стенд для прокачки электролита сквозь трубку корпуса капиллярного насоса (рис.5.17). На насос 2 устанавливался змеевик для охлаждения электромотора подачи электролита. С помощью трубопровода насос соединялся со специальным приспособлением 3. В емкость с электролитом 1 устанавливался медный змеевик 4 для охлаждения электролита. Как показано на рис. 5.18, на края трубки 2 устанавливались специальные фланцы 1, изготовленные с помощью 3D принтера. Так же через трубку был протянут нержавеющий электрод (катод) с намотанной поверх его нержавеющей проволокой 3.

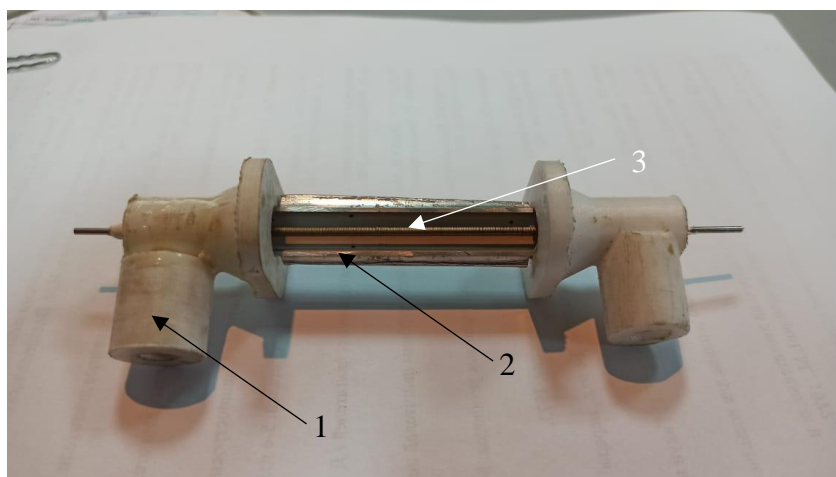


Рис. 5.16. Корпус капиллярного насоса



1 - ванна с электролитом; 2 – насос со змеевиком;
3 – специальное приспособление; 4 – медный змеевик.

Рис. 5.17. Стенд для прокачки электролита



1 – фланцы; 2 – корпус теплового насоса; 3 – нержавеющий электрод.

Рис. 5. 18. Конструкция в сборе.

Формирование МДО покрытия осуществлялось при следующих параметрах базового режима - $j = 10 \text{ А/дм}^2$, $t = 160 \text{ мин}$, $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, в электролите, состоящем из $\text{KOH} = 1 \text{ г/л}$, $\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 6 \text{ г/л}$. В результате было сформировано керамическое покрытие на внутренней стороне трубки суммарной толщиной 70 мкм (рис.5.19), при этом толщина основного слоя составляла 37 мкм.

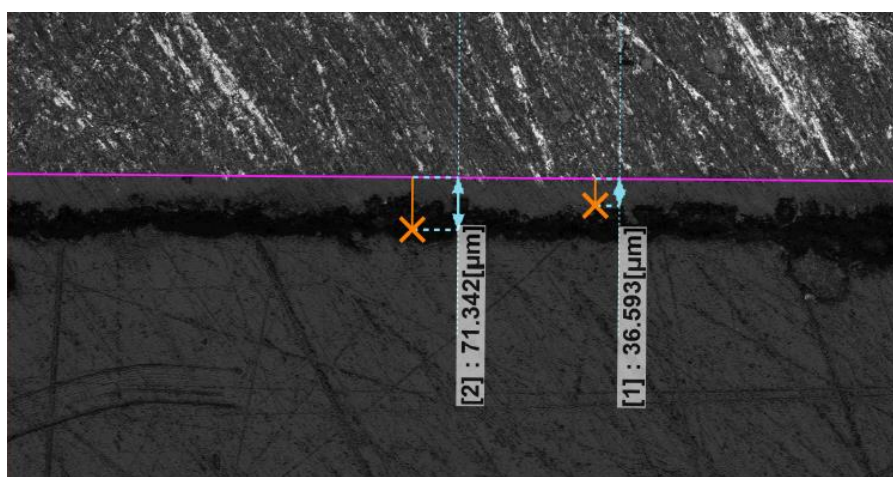


Рис. 5.21. Металлографический шлиф покрытия.

В акте об использовании результатов (от 27.01.2022 Приложение 4) этого исследования отмечено, что разработки кафедры 205 Московского авиационного института (национального исследовательского университета), а именно:

- стенд для прокачки электролита через трубку внешним диаметром 11 мм из сплава АД-1 элемента контурной тепловой трубы с целью нанесения опытного керамического покрытия на внутреннюю поверхность трубы, состоящий из: емкости с электролитом с установленным внутри змеевиком, водяного центробежного насоса, специальных фланцев, изготовленных с использованием 3D принтера по аддитивной технологии,

центрального нержавеющей электрода-катода с намотанной нержавеющей нитью, расположенного внутри трубки и центрируемого фланцами;

- опытный технологический процесса формирования электроизоляционного (до 1000В) керамического покрытия на внутренней поверхности трубки при соблюдении следующих режимов: плотность тока $-j= 10 \text{ А/дм}^2$, время нанесения – $t= 160 \text{ мин}$, температура электролита $T= 25 \text{ }^\circ\text{C}$ и состав электролита КОН- 1 г/л, Na_2SiO_3 - 6 г/л;
- результаты оценки толщины покрытий на оптическом микроскопе, показавшие, что суммарная толщина керамического покрытия составляет около 40 мкм;
- результаты проверки пробойного напряжения на установке УПУ-10 показавшие электропрочность в 1000В;

были использованы в поисковых исследованиях и разработках АО ГНЦ «Центр Келдыша».

Основное направление использованных разработок: нанесение электроизоляционного износостойкого слоя Al_2O_3 на внутреннюю цилиндрическую поверхность корпуса капиллярного насоса для обеспечения процесса электроимпульсного спекания при прессовании заготовки карбонильного порошка никеля, предназначенной для использования в качестве фитиля капиллярного насоса контурной тепловой трубы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для защиты от фреттинг-изнашивания обоснован выбор вёрдых смазочных покрытий и плазменные методы их формирования.

2. Проведён анализ контактного взаимодействия при фреттинге (на примере контактной пары сфера/плоскость), показано, что наиболее полно описываются процессы этого взаимодействия с применением упруго-пластической модели Герца- Миндлина- Вингсбо, определён механизм получения петель фреттинг-гистерезиса, рассмотрены их разновидности и их роль в построении карт фреттинга и приложении к развитию энергетического подхода для прогнозирования фреттинг-износа.

3. Проведенные исследования позволили получить следующие новые результаты:

- для композитного ТСП TiN-Pb, полученного магнетронным осаждением, экспериментально определено оптимальное с точки зрения минимального фреттинг-износа содержание свинца в покрытии (5-10% ат.); а построенные для этой композиции карты фреттинга с 16 % ат. свинца позволили в серии экспериментов получить все виды петель фреттинг-гистерезиса;
- исследование композитных фреттингостойких ТСП на керамическом материале SiAlON, с использованием энергетического подхода позволило определить влияние на фреттинг-изнашивание содержания кремния в покрытии (до 3% мас.) и в 2 раза увеличить его фреттингостойкость и получить покрытие с наилучшими трибологическими характеристиками, в 3 раза снизив значение коэффициента трения с 0,12 до 0,04;
- исследование керамикоподобного ТСП, полученного методом МДО, на алюминиевом сплаве АМг-6 позволило избежать схватывания в контакте трения, а также уменьшить коэффициент трения путём в 3,5 раза с 0,25 до 0,07;
- в результате исследования на фреттинг-изнашивание многослойных ТСП, полученных методом плазменного напыления в атмосфере, получена зависимость между величиной объемного износа и суммарной энергией диссипации и установлено, что покрытие NiAl-CuNiIn-Ni[Cg] + коллоидный графит + molykote 106 имеет наименьший коэффициент объемного износа;

4. Разработана и проверена на практике обобщённая методика выбора ТСП, стойких к фреттинг-изнашиванию.

5. Выполненные разработки нашли практическую реализацию и позволили сформулировать рекомендации по применению новых технических решений, подтвержденных результатами выполненных НИР и актами об их использовании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трение, изнашивание и смазка. Справочник. В 2-х кн./ Под ред. И.В. Крагельского и В.В. Алисина. -М.: «Машиностроение», 1979. - 400с
2. Петухов А. Н. Механизм фреттинга и фреттинг-усталость высоконагруженных малоподвижных соединений ГТД и ЭУ. -М.: ЦИАМ, 2008. -204с
3. Kapsa P. Environmental effects in fretting //Tribocorrosion of Passive Metals and Coatings, 2011. Pp. 100-117.
4. Achanta S., Drees D., Celis J. P. Nanocoatings for tribological applications //Nanocoatings and Ultra-Thin Films. – Woodhead Publishing, 2011. Pp. 355-396.
5. Berthier Y., Vincent L., Godet M. Velocity accommodation in fretting //Wear, 1988. – V. 125. – №. 1-2. Pp. 25-38.
6. Kapsa P., Fouvry S., Vincent L. Basic principles of fretting //Wear–Mechanisms, Materials and Practice, 2005. Pp. 317-338.
7. Rossman A. Fretting in aeroengine, Graz University of Technology, 2020. -79p.
8. M. Sujata, M. Madan, K. Raghavendra, and S.K. Bhaumik. "Fretting Fatigue in Aircraft Components Made of Ti-Al-V Alloys" Procedia Engineering, 2013, vol. 55. Pp. 481 – 486.
9. Рябченков А. В., Муравкин О. Н. Фреттинг-коррозия металлов и способы их защиты // В кн. «Коррозия и защита металлов в машиностроении». -М.: 1959. – С. 273-331
10. Уотерхауз Р.Б. Фреттинг-коррозия: пер. с англ. Л.: Машиностроение,1995. – 272 с.
11. P.Pempie. Tribology on Rocket Engine, STLE, At Las Vegas Conference Paper, 2005. -10p.
12. Полянский А. М., Полянский В. М. Особенности фреттинг-износа в ЖРД // Труды НПО Энергомаш им. академика В.П. Глушко, 2012, №. 29. – С. 265-276.
13. Nosaka M., Kato T. Cryogenic tribology in high-speed bearings and shaft seals of rocket turbopumps //Tribology—Fundamentals and Advancements, INTECH, 2013. Pp. 109-153.
14. Sforza P. M. Theory of aerospace propulsion. // Elsevier – Butterworth-Heinemann, 2016. Pp. 517-540.
15. Гаркунов Д. Н. Триботехника (износ и безызносность): Учебник. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Издательство МСХА, 2001. -616 с.
16. Eassner E. On the influence of fretting corrosion on the fatigue life of notched spicemens of Al-Cu-Mh alloy in: Fatigue Aircraft Struct, Pergamon Press, 1963. Pp.89-95.
17. Zhou Z. R., Vincent L. Lubrication in fretting—a review //Wear, 1999, V.225. Pp. 962-967
18. Kumar R, Kumar Banga H., Singh H., Kundal S., An outline on modern day applications of solid lubricants // Materials Today: Proceedings, 2020. V.28, part 3. Pp. 1962-1967
19. Брейтуэйт Е. Р. Твердые смазочные материалы и антифрикционные покрытия //М.: Химия, 1967. - 320с.

20. Holmberg K., Matthews A. Coatings tribology: properties, mechanisms, techniques and applications in surface engineering. – Elsevier, 2009.-560p.
21. Coating technology for vehicle applications. Editors: S. Cha, A. Erdemir, Springer international publishing, 2015. - 240p.
22. Donnet C., Erdemir A. Solid lubricant coatings: recent developments and future trends //Tribology letters, 2004. – V. 17. – №. 3. Pp. 389-397.
23. Donnet C., Erdemir A. Historical developments and new trends in tribological and solid lubricant coatings //Surface and coatings technology, 2004. – V. 180. Pp. 76-84.
24. Robertson J. Diamond-like amorphous carbon //Materials science and engineering: R: Reports, 2001. – V. 37. Pp. 129-281.
25. Matthews A. Developments in PVD tribological coatings (IUVSTA highlights seminar-vacuum metallurgy division) //Vacuum, 2002. – V. 65. – №. 2. Pp. 237-238.
26. Jehn A., Multicomponent and multiphase hard coatings for tribological applications, Surface and Coatings Technology, 2000. -V. 131 (1–3). Pp. 433-440
27. Кривобоков В. П., Сочугов Н. С., Соловьев А. А. Плазменные покрытия (свойства и применение) //Изд-во Томского политехнического университета, Томск. – 2011. – 136с.
28. Pauleau Y. Friction Mechanism and Fundamental Aspects in Solid Lubricant Coatings //Chapter 17 in Materials Surface Processing by Directed Energy Techniques, 2006. Pp.573- 593.
29. Fuentes G. G. et al. Gradient CrCN cathodic arc PVD coatings //Thin Solid Films, 2009. – V. 517. – №. 20. Pp. 5894-5899.
30. Musil J., Šůna J. The role of energy in formation of sputtered nanocomposite films //Materials Science Forum. – Trans Tech Publications Ltd, 2005. – V. 502. – pp. 291-296.
31. Holleck H., Schier V. Multilayer PVD coatings for wear protection //Surface and Coatings Technology, 1995. – V. 76. – pp. 328-336.
32. Voevodin A. A., Zabinski J. S. Nanocomposite and nanostructured tribological materials for space applications / Composites Science and Technology, 2005. - V.65. - pp. 741-748.
33. Хокинг М., Васантасри В., Сидки П. Металлические и керамические покрытия: Получение, свойства и применение / Пер. с англ.–М.: Мир-2000.–518 с.
34. Сыркин В. Г. CVD-метод. Химическое парофазное осаждение / М.: Наука, 2000. - 482с.
35. Никитин М. М. Технология и оборудование вакуумного напыления //Металлургия, 1992. – 112с.
36. Майорова Л.А. Твердые неорганические вещества в качестве высокотемпературных смазок. Новое о твердых смазках. М.: Наука, 1971. - 96 с.

37. J.P. Celis, J.R. Raos, M.De. Bonte. Development and application of electroless coating. In surface modification technology. Pensilvania, USA. The metallurgical society, 1988. Pp.215-235
38. Самсонов Г.В., Эпик Л.П. Тугоплавкие покрытия. Изд. 2-е, пер. и доп. -М.: «Металлургия», 1973. – 400с.
39. Yerokhin A. L. et al. Plasma electrolysis for surface engineering (review) //Surface and coatings technology, 1999. - V.122 (2-3). - Pp.73-93.
40. Draper C. W., Poate J. M. Laser surface alloying //International metals reviews, 1985. -V. 30, - №. 2. Pp. 85-108.
41. Хасуи, А. Наплавка и напыление. пер. с яп. М.: Машиностроение, 1985. - 240с.
42. Espallargas N. (ed.). Future development of thermal spray coatings: Types, designs, manufacture and applications. – Elsevier, 2015. 339p.
43. Нанесения защитных покрытий: Руководство для инженеров. – Серпухов: ООО «Термал спрей тек», 2009. – 72с.
44. А.П. Алхимов, С.В. Клинков, В.Ф. Косарев, В.М. Фомин. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика/ Под.ред. В.М. Фомина. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 536с.
45. Mindlin, R. D., and Deresiewicz, H. (June 4, 2021). "Elastic Spheres in Contact Under Varying Oblique Forces." // ASME. J. Appl. Mech. 1953; V75. Pp. 327–344.
46. B.P. Conner. Contact fatigue: life prediction and palliatives. Thesis Phd, 2002. -135p.
47. Ödfalk M., Vingsbo O. An elastic-plastic model for fretting contact //Wear. 1992. V. 157. №. 2. Pp. 435-444.
48. R.D. Mindlin. Compliance of elastic bodies in contact// Journals of applied mechanics, 1949. V.71 Pp.259-268.
49. Johnson K. L., Johnson K. L. Contact mechanics. – Cambridge university press, 1985.
50. Vingsbo O., Odlack M. Conditions for elastic contact in fretting / Prac. Japan Int. Tribology conference, Tokyo. 1990. Pp. 833-838.
51. C. V. Suciú and T. Uchida, Modeling and Simulation of the Fretting Hysteresis Loop, 2010 International Conference on P2P, Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing, 2010, Pp. 560-564
52. Kim K., Korsunsky A. M. Dissipated energy and fretting damage in CoCrAlY-MoS₂ coatings //Tribology International. 2010. V. 43. №. 3. Pp. 676-684.
53. Argatov, Ivan & Chai, Young S. An analytical approach to the third body modelling in fretting wear contact: A minireview. Facta Universitatis, 2021, Series: Mechanical Engineering, -8p.
54. Hager Jr C. H., Sanders J. H., Sharma S. Characterization of mixed and gross slip fretting wear regimes in Ti6Al4V interfaces at room temperature //Wear, 2004. V. 257. №. 1-2. Pp. 167-180.

55. Zhou Z. R. et al. Progress in fretting maps // Tribology International, 2006. V. 39. №. 10. Pp. 1068-1073.
56. Vingsbo O., Söderberg S. On fretting maps // Wear, 1988. V. 126. №. 2. Pp. 131-147.
57. Fouvry S., Kapsa P., Vincent L. Developments of fretting sliding criteria to quantify the local friction coefficient evolution under partial slip condition //Tribology Series, Elsevier, 1998. V. 34. Pp. 161- 172.
58. Sauger E. et al. Tribologically transformed structure in fretting //Wear, 2000, V.245. №. 1-2. pp. 39-52.
59. Fouvry S., Kapsa P., Vincent L. Quantification of fretting damage //Wear, 1996. V.200. №. 1-2. Pp.186-205.
60. ГОСТ 23.211-80. Метод испытаний материалов на изнашивание при фреттинге и фреттинг-коррозии. М.: Стандартиформ, 2005. – 6с.
61. Varenberg M., Etsion I., Halperin G. Slip index: a new unified approach to fretting //Tribology Letters. 2004. V. 17. №. 3. Pp. 569-573.
62. Blanchard P. et al. Material effects in fretting wear: application to iron, titanium, and aluminum alloys //Metallurgical Transactions A, 1991. V.22. №. 7. pp. 1535-1544.
63. Лесневский Л.Н., Ляховецкий М.А., Разработка и применение установки для определения фреттинг-износа образцов с твердыми покрытиями // Тезисы докладов XXII Международной Инновационно-ориентированной Конференции Молодых Ученых и Студентов «Актуальные проблемы машиноведения» МИКМУС-2012, М.: Изд-во ИМАШ РАН, 2012. - С.32
64. Еремкина М. С., Николаев И.А., Кожевников Г.Д., Пожидаев А.А. Система трибомониторинга для исследования процесса фреттинг-изнашивания в условиях возвратно-поступательного скольжения. //Научно-технический вестник Поволжья, 2020. №. 1. С. 84-87.
65. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020667087. Программное обеспечение для определения трибологических характеристик пар трения автоматизированного испытательного стенда «Машина трения 1401»/ М.А. Ляховецкий, Д.А. Петриченко, Д.Д. Королев, И.А. Николаев Заявка №2020667087. Дата поступления 10 декабря 2020 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 21 декабря 2020 г.
66. Erdemir A, Eryilmaz OL, Urgen M, Kazmanli K, Mehta N, Prorok B. Tribology of nanostructured materials and coatings. Handbook of Nanomaterials; 2005. Pp. 685-711.
67. A. Oeztuerk, K.V. Ezirmik, K. Kazmanli at all. Comparative tribological behaviors of TiN-, CrN- and MoN-Cu nanocomposite coatings// Tribology International, 2008. V.41. Pp.49-59.

68. А.М. Ушаков. Разработка технологии получения износостойких твердосмазочных покрытий в магнетронных распылительных системах для узлов трения ДЛА: Дис. к.т.н., 2003. - 209 с.
69. Лесневский Л.Н., Тюрин В.Н., Ушаков А.М. Способ формирования композитных твердосмазочных покрытий на рабочих поверхностях узлов трения. Патент на изобретение №2416675 от 20.04.2011. – 7 с.
70. Кондратьев В.А., Лесневский Л.Н., Тюрин В.Н., Ушаков А.М. Анализ состава и триботехнические характеристики износостойкого покрытия TiN на сплавах и керамике при сухом трении // Проблемы машиностроения и надёжности машин, 2004. №2. С. 49-54.
71. Lesnevskiy L.N., Lyakhovetskiy M.A., Lozovan A.A., Nikolaev I.A., Tribological properties of TiN-Pb system solid lubricant coatings with various morphologies // Journal of Physics: Conference Series, 2019 1281 012049
72. Lesnevskiy L.N., Lyakhovetskiy M.A., Lozovan A.A., Nikolaev I.A., Pavlov Y.S. Tribological properties of solid lubricating coatings of the TiN-Pb system at various Pb content // Journal of Physics: Conference Series, 2020. 1713 012029-6p.
73. Lozovan A., Betsofen S., Lyakhovetskiy M., Pavlov Yu., Grushin I., Kubatina E., Nikolaev I. Structure and Properties of TiN–Pb Composite Coatings Deposited on VT6 Alloy Magneton Sputtering DC // Russ. J. Non-ferrous Metals. 2021. V. 62 (5). pp. 554–560 DOI: 10.3103/S1067821221050072
74. Лесневский Л.Н., Николаев И.А., Ушаков А.М. Разработка и исследование твердых смазочных покрытий систем TiN и TiN-Pb для защиты от износа и фреттинг-износа элементов турбонасосного агрегата ЖРД // Вестник УГАТУ. 2022. Т.27. №.3 (97). С.66-77.
75. L. Vincent, Y. Berthier, M.C. Dubourg, M. Godet, Mechanics and materials in fretting, Wear, 1992, V. 153. pp. 135-148.
76. Fouvry S., Kapsa P., Vincent L. Analysis of sliding behaviour for fretting loadings: determination of transition criteria //Wear, 1995. V. 185. №. 1-2. Pp. 35-46.
77. Lisa L., Régis E., Descartes S., Chromik R.. (2015). Fretting wear behavior of Zn–Ni alloy coatings. Wear, 2015 v. 330-331. Pp.112-121.
78. Jouko Hintikka, Arto Lehtovaara, Antti Mäntylä, Normal displacements in non-Coulomb friction conditions during fretting// Tribology International, 2016. V. 94. Pp. 633-639
79. Каблов Е. Н. Инновационные разработки ФГУП "ВИАМ" ГНЦ РФ по реализации Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года" //Авиационные материалы и технологии. 2015. №. 1 (34). С.3-33.

80. Стрелов К. К. Теоретические основы технологии огнеупорных материалов: Учеб. пособие для вузов / К.К. Стрелов, И.Д. Кашеев. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Metallurgy, 1996. - 608 с.
81. Кочина Т. Б. Применение высокопроизводительного режущего инструмента при механической обработке жаропрочных сплавов на никелевой основе //Металлообработка. 2009. №. 3 (51). С. 5-7.
82. Voevodin A. A., Muratore C., Aouadi S. M. Hard coatings with high temperature adaptive lubrication and contact thermal management //Surface and Coatings Technology, 2014. V. 257. Pp. 247-265.
83. Верещака А. А. Функциональные покрытия для режущих инструментов //Вестник Брянского государственного технического университета, 2015. №. 4 (48). С.25-37.
84. Grigoriev S.N., Volosova M.A., Fedorov S.V., et al. Development of DLC-Coated Solid SiAlON/TiN Ceramic End Mills for Nickel Alloy Machining: Problems and Prospects// Coatings, 2021.V.11. Pp. 532-559.
85. Volosova, M., Grigoriev, S., Metel, A. and Shein, A., The role of thin-film vacuum-plasma coatings and their influence on the efficiency of ceramic cutting inserts // Coatings 2018 V.8 (8), 287p.
86. Grigoriev S. et al. DLC-coating application to improve the durability of ceramic tools // Journal of Materials Engineering and Performance, 2019. V. 28. №. 7. Pp. 4415-4426.
87. Kuzin V. V., Grigor'Ev S. N., Volosova M. A. Effect of a TiC coating on the stress-strain state of a plate of a high-density nitride ceramic under nonsteadythermoelastic conditions //Refractories and Industrial Ceramics, 2014. V. 54. №. 5. Pp. 376-380.
88. Xu, X., Nishimura, T., Hirosaki, N., Xie, R. J., Yamamoto, Y. and Tanaka, H., Fabrication of β -sialonnanoceramics by high-energy mechanical milling and spark plasma sintering, Nanotechnology, 2005, 16(9), Pp.1569-1573.
89. Szutkowska, M., Cygan, S., Podsiadło, M., Laszkiewicz-Łukasik, J., Cyboron, J. and Kalinka, A., Properties ofTiC and TiN Reinforced Alumina–Zirconia Composites Sintered with Spark Plasma Technique, 2019 Metals 9(11),1220p.
90. Jojo, N., Shongwe, M. B., Tshabalala, L.C. and Olubambi, P.A., Effect of Sintering Temperature and YttriumComposition on the Densification, Microstructure and Mechanical Properties of Spark Plasma Sintered SiliconNitride Ceramics with Al₂O₃ and Y₂O₃ Additives, 2019, Silicon 11, Pp.2689-2699
91. Kandemir A. et al. First-principles investigation of titanium doping into β -sialon crystal in tin-sialon composites for EDM applications // Materials Chemistry and Physics, 2015. V. 162. Pp.781-786.

92. Calloch P. et al. Oxidation resistance of β -Sialon/TiN composites: an ion beam analysis (IBA) study // *Journal of Materials Science*, 2018. V.53. №. 22. Pp. 15348-15361.
93. Herrmann M., Höhn S., Bales A. Kinetics of rare earth incorporation and its role in densification and microstructure formation of α -Sialon // *Journal of the European Ceramic Society*, 2012. V.32. №. 7. Pp. 1313-1319.
94. Sevgi Canarlan Ö. et al. Microwave sintering of SiAlON ceramics with TiN addition // *Materials*, 2019. V. 12. №. 8. 1345p.
95. Volosova M., Fedorov V., Lyakhovetskiy M., Mustafaev E., Melnik Y. Effect of PACVD deposition of nitride and Si-containing amorphous hydrogenated carbon films on the tribological characteristics of SiAlON ceramics / *Proc. SPIE 11802, Nanoengineering: Fabrication, Properties, Optics, Thin Films, and Devices XVIII*, 118020T.
96. Лесневский Л.Н., Ляховецкий М.А., Николаев И.А., Волосова М.А. Трибология многослойных композиционных твердых смазочных покрытий на сialоне для использования их в узлах трения ГТД // *Вестник УГАТУ*. 2022. Т. 26. №. 2 (96). С. 13-23.
97. A.L. Yerokhin, X. Nie, A. Leyland, A. Matthews, S.J. Dowey, Plasma electrolysis for surface engineering// *Surface and Coatings Technology*, 1999. V. 122 (2–3), Pp.73-93.
98. Суминов И.В., Белкин П.Н., Эпельфельд А.В. и др. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов// Под ред. И.В. Суминов В 2-х т. Т.2. — М.: Техносфера, 2011. — 512 с.
99. Семенов А. П. Схватывание металлов. М. : Машгиз, 1958. – 280 с.
100. H.-J. Kim, A. Emge, S. Karthikeyan, D.A. Rigney, Effects of tribooxidation on sliding behavior of aluminum// *Wear*. 2005. V.259 (1–6). Pp. 501-505.
101. Elleuch K., Fouvry S., Kapsa Ph. Fretting maps for anodised aluminium alloys// *Thin Solid Films*, V.426 (1–2), 2003. Pp. 271-280.
102. Zhou Z. R. et al. Progress in fretting maps // *Tribology International*, 2006. V. 39. №. 10. pp. 1068-1073.
103. Kustas F. M. Friction and wear of titanium alloys / *ASM Handbook*, V.18, 1992. Pp. 1169 – 1176.
104. Миллер П. Д., Холлидэй И. В. Трение и износ титана. Машиностроение за рубежом / Сб. пер. и обзоров иностр. лит. – М.: Машиностроение, 1959. Вып. 6. С. 10-20.
105. Пугина Л. И., Синявская М. Д., Максимчук И. М., Дисульфид молибдена, его свойства и применение. - Киев: Наукова думка, 1968. - 50 с.
106. Федорченко И.М., Пугина Л.И. Композиционные спеченные антифрикционные материалы. Киев: Наук, думка, 1980. - 404 с.
107. Raz Y., Dirnfeld S. Plasma Arc Spraying of Ti-6Al-4V With Cu-Ni-In // *Surface Engineering*.

1990. V.6. №.2. Pp. 121-124.
- 108.Брейтуэйт Е. Р. Твердые смазочные материалы и антифрикционные покрытия //М.: Химия. – 1967.
- 109.Петлюк А.М., Сентюрихина Л.Н., Лазовская О.В., Южно Т.П. Температурная зависимость износостойкости твёрдых смазочных покрытий, содержащих дисульфид молибдена и графит / Трение и износ.1987. т.8, №4.
- 110.Сентюрихина Л.Н. и др. Исследование работоспособности ТСП с бинарным антифрикционным компонентом // Трение и износ, 1987. Т.8. №1.
- 111.Александров В. Г., Базанов Б. И. Справочник по авиационным материалам и технологии их применения. – М.: Транспорт, 1979. – 242с.
- 112.Лесневский Л.Н., Трошин А.Е. и др. Разработка и исследование износостойкого самосмазывающегося покрытия на базе порошка никель-графит. Technical report on SNECMA – MAI contract №2 – 98 (9403015) date 23.01.98 with Amendment dated 27.09.2003. Stage №10 additional agreement №1 (920381867) dated 13.02.2004. МАИ, 2005. – 152с.
- 113.Лесневский Л.Н., Трошин А.Е., Жоэль Винью. Способ защиты поверхности механического контакта между двумя металлическими деталями, на которых использована такая защита. Изобретение RO 2005 121 165. – 5с.
- 114.Kim K., Korsunsky A. M. Effects of imposed displacement and initial coating thickness on fretting behaviour of a thermally sprayed coating //Wear, 2011. V. 271. №. 7-8. Pp. 1080-1085.
- 115.Korsunsky A. M., Kim K. Dissipated energy and friction coefficient evolution during fretting wear of solid lubricant coatings //Tribology international, 2010. V. 43. №. 5-6. Pp. 861-867.
- 116.D. B. Luo, V. Fridrici, Ph. Kapsa A systematic approach for the selection of tribological coatings // Wear, 2011. Pp. 2132-2143.
117. K. Holmberg, H. Ronkainen, A. Matthews Tribology of thin coatings // Ceramics International, 2000. V.26. Pp.787-795.
- 118.B. C. Na, A. Tanaka, Tribological characteristics of diamond-like carbon films based on hardness of mating materials // Thin Solid Films 2005. V.478. Pp. 176-182.
119. S. Hogmark, P. Hedenqvist, S. Jacobson, Tribological properties of thin hard coatings: demands and evaluation // Surface and Coatings Technology, 1997. V.90. Pp. 247-257.
120. N. Fujisawa, D. R. McKenzie, N. L. James, J. C. Woodard, M. V. Swain. Combined influences of mechanical properties and surface roughness on the tribological properties of amorphous carbon coatings // Wear 2006. V.260. Pp. 62-74.
121. A. Leyland, A. Matthews. On the significance of the H/E ratio in wear control: a nanocomposite coating approach to optimized tribological behavior // Wear 2000. V. 246. pp.1-11.

122. S. Zhang, D. Sun, Y. Fu, H. Du Effect of sputtering target power on microstructure and mechanical properties of nanocomposite nc-TiN/a-SiN_x thin films // *Thin Solid Films*, 2004. V. 447-448. Pp. 462-467
123. C. Subramanian, K.N. Stratford, T. P. Wilks, L. P. Ward, On the design of coating systems: metallurgical and other considerations // *Journal of Materials Processing Technology*. 1996. V. 56. Pp. 385-397
124. J. Takadom, H. H. Bennani, Influence of substrate roughness and coating thickness on adhesion, friction and wear of TiN films // *Surface and Coatings Technology*, 1997. V. 96. pp. 272-282.
125. Николаев И. Исследование трибологических свойств твердых смазочных покрытий, полученных путем магнетронного осаждения и атмосферного плазменного напыления // Тезисы XLV Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения». – 2019. – С. 133-134.
126. M. Sedlacek, B. Podgornik, J. Vizintin Tribological properties of DLC coatings and comparison with test results: Development of a database // *Materials Characterisation*, 2011. V. 59 (2), pp. 151-161.
127. K. Holmberg A concept for Friction Mechanisms of Coated Surfaces // *Surface and Coating Technology*, 1992. V. 56 Pp. 1-10.
128. Л.Н. Лесневский Разработка покрытий типа «Твердая Смазка» для двигателей и энергоустановок летательных аппаратов // Вестник научно-технического развития. Национальная технологическая группа, 2011. №1 (41). С.61-70.
129. S. Hogmark, S. Jacobson, L. Mats, Design and evaluation of tribological coatings, *Wear* 246 (2000) Pp.20-33.
130. Ch. Donnet, A. Erdemir. Friction Mechanisms and Fundamental Aspects in Solid Lubricant Coatings. Chapter 17 in *Materials Surface Processing by Direct Energy Techniques*. Editor Y. Pauleau, Elsevier Limited, 2006. Pp. 573 – 593.
131. Вьюнов С.А., Тусов Ю.И., Карпов А.В. и др. Конструкция и проектирование авиационных газотурбинных двигателей / Под ред. Д.т.н. Хромина Д.В., 1989. – 386с.
132. Rao V.D.N., Cikanek H.A., Boyer B.A., Lesnevskiy L.N., Tchernovsky M.N., Tyurin V.N. Friction and wear characteristics of micro-arc oxidation coating for light weight, wear resistant, powertrain component application – SAE Technical Paper №970022. 1997. Pp. 91-105.
133. Бойцов Б.В., Лесневский Л.Н., Ляховецкий М.А., Петухов Ю.В., Прусс Е.М., Трошин А.Е., Ушаков А.М., Повышение надёжности алюминиевых прессформ путём защиты их от износа и коррозии методом микродугового оксидирования // Журнал «Проблемы машиностроения и надёжности машин», 2013. №6. - С. 45-53

ПРИЛОЖЕНИЕ 1



ЗАТВЕРЖДАЮ
И.о. проректора по научной работе
Ю.А. Равикович

2022 г.

АКТ

о внедрении в НИР МАИ результатов диссертационной работы Николаева И.А. «Повышение фреттингостойкости элементов ДЛА и ЭУ с использованием твёрдых смазочных покрытий»

Настоящий акт составлен о том, что результаты кандидатской диссертации Николаева И.А. использованы при проведении научно-исследовательских работ:

- «Теоретическо-расчетные исследования авиационных двигателей нового поколения и экспериментальная отработка элементов конструкций» (договор МАИ с ОКБ им. А.Люльки филиал ПАО «ОДК-УМПО» № 242-3 от 20 ноября 2018г.);

- «Экспериментально-исследовательские работы в области формирования перспективных технологических и конструкторских решений и модернизации испытательной базы» (договор МАИ с ОКБ им. А.Люльки филиал ПАО «ОДК-УМПО» №161 от 5 октября 2020);

- «Сравнительные испытания антифреттингового покрытия на образцах» (договор МАИ с АО «ОДК-Авиадвигатель» № 17705596339190000540/МАИ/202 от 24 ноября 2020г.);

- государственное задание Минобрнауки России №FSFF-2020-0014 «Методы математического и физического моделирования процессов формирования, ускорения многофазных потоков и потоков заряженных частиц, их взаимодействия с поверхностями с целью исследования и создания перспективных двигателей летательных аппаратов нового поколения»;

и подготовке совместных публикаций:

- с МГТУ «Станкин» - Л. Н. Лесневский, М. А. Ляховецкий, И.А. Николаев, М. А. Волосова «Трибология многослойных композиционных твёрдых смазочных покрытий на сialоне для использования их в узлах трения ГТД», журнал Вестник УГАТУ, 2022

- с РКК Энергия им. С.П. Королёва - И.Е. Мальцев, А.А. Басов, Л.Н. Лесневский, Л.В. Денисов, И.А. Николаев, М.С. Еремкина «Влияние электроискрового легирования (ЭИЛ) на геометрические и трибологические свойства поверхности сплава AlSi10Mg, полученного методом селективного лазерного сплавления», журнал ЭЛЕКТРОМЕТАЛЛУРГИЯ, 2022

Директор дирекции Института №2

В.П. Монахова

И.о. нач. НИО 205

М.А. Ляховецкий

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный конструктор-директор ОКБ
им. А. Люльки
Е.Ю. Мариуков



« » 2022 г.

АКТ

об использовании результатов НИР по теме «Исследования износостойкости штатных твердых смазочных покрытий для поворотного узла 1-й ступени направляющего аппарата компрессора низкого давления», договор МАИ с ОКБ им. А.Люльки филиал ПАО «ОДК-УМПО» № 242-3 от 20 ноября 2018 г.

Настоящий акт составлен о том, что при выполнении работ по договору в части, касающейся выполнения Раздела 2 «Результаты испытания модельных образцов», принял участие аспирант каф.205 Николаев И.А. С его участием проведены трибологические испытания и подбор противоизносных материалов сплавов и покрытий, указанных в таблице 1:

Таблица 1. Перечень противоизносных сплавов и образцов в парах трения

Пара трения	Образец (Внутренняя втулка)	Образец (Внешняя втулка)	Изготовитель
1.	BT 9 (альфированный)	NiTi-TiC	УМПО-НИИД
2.	BT 9 (альфированный)	ВНС 32	УМПО
3.	BT 9 (альфированный)	ВЖЛ 2	УМПО
4.	NiTi-TiC	NiTi-TiC	НИИД
5.	BT 9 (альфированный)	ВЖЛ 1 (C1)	УМПО
6.	BT 9 (Mo+MoS ₂)	ВЖЛ 1 (C1)	МАИ-ТСТ
7.	BT 9 (Ni Cg +MoS ₂)	ВЖЛ 1 (C1)	МАИ
8.	BT 9 (TiN-Pb)	ВЖЛ 1 (Mo)	МАИ
9.	BT9 (Modengy)	ВЖЛ 1 (Mo)	УМПО

Исследования были проведены в условиях лаборатории на машине трения каф.205 МАИ №3308 при испытаниях на фреттинг-износ в возвратно-поступательном режиме при следующих условиях нагружения:

- нормальная нагрузка - 30Н;
- частота - 5 Гц;
- величина перемещения – 2 мм;
- время испытаний - 33 минуты.

Величина износа определялась по изменению массы образцов, измеренной перед началом испытаний и после испытаний.

На основе проведенных испытаний на образцах было установлено, что:

- никелевый сплав ВЖЛ 2 и сталь ВНС 32 в паре с альфированным титановым сплавом BT 9 (альфированный) показало значительное улучшение

износостойкости по сравнению со штатной парой ВТ9 (альфированный)/ ВЖЛ 1 в 10 и 4 раза, соответственно;

- опробованный в паре трения ВТ 9 (альфированный)/ NiTi-TiC износостойкий материал как NiTi-TiC продемонстрировал незначительное повышение износостойкости, а в паре трения NiTi-TiC/NiTi-TiC показатель износостойкости ухудшился значительно по сравнению со штатной парой;
- из трех использованных материалов покрытий Ni[Cg]+MoS₂, Mo+MoS₂ и Modengu на титановом сплаве ВТ9 наилучшее значение по износостойкости продемонстрировала пара трения Ni[Cg]+MoS₂/ВЖЛ 1, величина износа которого в 10 раз меньше по сравнению со штатной парой ВТ9 (альфированный)/ ВЖЛ 1, поэтому оно рекомендуется для дальнейших испытаний в условиях реального поворотного узла;
- по сравнению с парой ВТ9 (Modengu)/ВЖЛ 1(Mo) пара трения Ni[Cg]+MoS₂/ВЖЛ 1 предпочтительней, т.к. напыление на внутреннюю поверхность втулки методом плазменного атмосферного напыления вызывает ряд технологических сложностей;
- применение системы покрытий ВТ9 (TiN-Pb)/ ВЖЛ 1(Mo) позволило уменьшить суммарный износ в 2 раза по сравнению со штатной парой трения ВТ9 (альфированный)/ ВЖЛ 1.

Полученные результаты были использованы в поисковых исследованиях ОКБ им. А.Люльки филиал ПАО «ОДК-УМПО» и разработке рекомендаций по использованию толстослойных газотермических покрытий наилучших составов для защиты от износа и фреттинг-износа рабочих поверхностей поворотных узлов направляющего аппарата компрессора низкого давления ГТД.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3



Утверждаю
Главный конструктор
Научно-энергетического модуля, к.т.н.
А.Г.Бидеев

Акт об использовании результатов исследований.

Комиссия в составе начальника отделения Басова А.А., заместителя руководителя научно-технического центра Жаркова М.Н., заместителя начальника отдела Белоусова Н.И., начальника отдела Елизарова Ю.С. настоящим актом подтверждает использование в ПАО «РКК «Энергия» при проведении поисковых работ результатов исследований Николаева И.А. аспиранта кафедры 205 «Технология производства двигателей летательных аппаратов» Московского авиационного института. Исследования проводились в лаборатории «Плазменные технологии покрытий».

Результаты, полученные Николаевым И.А. использованы при разработке мероприятий по снижению первоначального усилия трения при запуске в рабочей среде «аммиак» электромеханических агрегатов системы обеспечения теплового режима, в том числе электронасосного агрегата с гидростатическим подвесом ротора.

Полученные Николаевым И.А. методом микродугового окислирования антифрикционные покрытия после отработки технологии контролируемого удаления внешнего (технологического) рыхлого слоя могут быть рекомендованы к использованию в мало и средненагруженных парах трения, в том числе работающих в средах с низким смазывающим эффектом.

Начальник отделения
систем терморегулирования, к.т.н.

А.А.Басов

Зам.руководителя научно-технического центра
«Конструирование мехатронных,
электрогидравлических средств, средств
робототехнического обеспечения и бортовой
аппаратуры»

М.Н.Жарков

Заместитель начальника отдела
электрогидравлических систем, приводов,
агрегатов

Н.И.Белоусов

Начальник отдела проектирования и поддержки
эксплуатации элементов пилотируемых
космических станций

Ю.С.Елизаров

Подписи Басова А.А., Жаркова М.Н., Белоусова Н.И., Елизарова Ю.С. заверяю

Ученый секретарь, д.ф-м.н.

О.Н.Хатунцева

ПРИЛОЖЕНИЕ 4



Государственная корпорация по космической деятельности «Роскосмос»
АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
«ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ИМЕНИ М.В.КЕЛДЫША»
(АО ГНЦ «Центр Келдыша»)

АКТ

24.01.2022

№ 8-05/3

Москва

об использовании результатов, полученных в лаборатории «Плазменные технологии покрытий» института №2 «Двигатели летательных аппаратов» кафедры №205 «Технология проектирования Двигателей летательных аппаратов» Московского авиационного института (национального исследовательского университета)



УТВЕРЖДАЮ

Начальник отделения
Н.И. Филатов

Настоящий акт составлен в том, что разработки кафедры 205 Московского авиационного института (национального исследовательского университета), а именно:

– разработка проекта и изготовление приспособления для нанесения разделительного слоя Al_2O_3 на внутреннюю цилиндрическую поверхность ($\varnothing 10$ мм, длиной 81 мм) заготовки из сплава АД1 состоящее из:

- ёмкости с электролитом с установленным внутри змеевиком для его охлаждения;
- водяного центробежного насоса для прокачки электролита через трубку;
- двух изолирующих фланцев, изготовленных из пластика АБС последовательным сплавлением по аддитивной технологии на 3D принтере Anycubics;

– центрального нержавеющей электрода (катода) $\varnothing 1,5$ мм, устанавливаемого внутри трубки и центрируемого изолирующими фланцами, с намотанной на него нержавеющей проволокой $\varnothing 0,5$ мм, для увеличения рабочей площади этого электрода;

– опытный технологический процесс формирования разделительного керамического покрытия на внутренней поверхности трубки при соблюдении следующих режимов: плотность тока $j = 10$ А/дм², время нанесения $t = 160$ мин, температура электролита $T = 25$ °С и состав электролита КОН- 1 г/л, Na_2SiO_3 - 6 г/л;

– результаты оценки толщины покрытия на оптическом микроскопе, показавшие, что суммарная толщина разделительного керамического покрытия составила около 50 мкм, и проверки пробойного напряжения на установке УПУ-10, показавшие электропрочность в 1000В.

Были использованы в опытных поисковых исследованиях АО ГНЦ «Центр Келдыша».

Основное направление использованных разработок: нанесение разделительного слоя Al_2O_3 на внутреннюю цилиндрическую поверхность корпуса капиллярного насоса для обеспечения процесса электроимпульсного спекания заготовки карбонильного порошка никеля, предназначенной для использования в качестве фитиля капиллярного насоса контурной тепловой трубы.

Основные исполнители НИР от МАИ: доцент Ляховецкий М.А., аспирант Николаев И.А., аспирант Еремкина М.С.

Главный конструктор

А.В. Хлынов

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе МАИ

Д.А. Козорез

« » 2022 г.



АКТ

о внедрении в учебный процесс МАИ результатов диссертации
Николаева И.А. «Повышение фреттингостойкости элементов ДЛА и ЭУ с использованием
твёрдых смазочных покрытий».

Настоящий акт составлен о том, что результаты кандидатской диссертации Николаева
И.А. использованы:

1. при подготовке и проведении практических и лабораторных работ по следующим направлениям подготовки:
 - 24.05.02 «Проектирование авиационных и ракетных двигателей»;
 - 24.03.05 «Двигатели летательных аппаратов»;
2. при выполнении курсовых и дипломных проектов студентами института №2.

Директор дирекции Института №2
Зав. кафедрой №205

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'В.П. Монахова'.

В.П. Монахова
Е.Ю. Марчуков

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2020667087

Программное обеспечение для определения трибологических характеристик пар трения автоматизированного испытательного стенда «Машина трения 1401»

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (RU)*

Авторы: *см. на обороте*



Заявка № **2020666391**

Дата поступления **10 декабря 2020 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **21 декабря 2020 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

 **Г.П. Ивлиев**

Авторы: Ляховецкий Максим Александрович (RU), Петриченко Дмитрий Анатольевич (RU), Королев Даниил Дмитриевич (RU), Николаев Илья Алексеевич (RU)