

На правах рукописи



Николаев Илья Алексеевич

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

Специальность: 2.5.15. - Тепловые, электроракетные двигатели и
энергоустановки летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Лесневский Леонид Николаевич

Официальные оппоненты: Самойленко Василий Михайлович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации», заведующий кафедрой «Авиатопливообеспечения и ремонта летательных аппаратов»

Климов Вадим Геннадьевич, кандидат технических наук, руководитель департамента продаж двигателей боевой авиации АО «ОДК»

Ведущая организация: Федеральное автономное учреждение «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова»
(ФАУ «ЦИАМ имени П.И. Баранова»)

Защита состоится « 27 » декабря 2022 года в 15 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.327.06 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»:
<https://mai.ru/upload/iblock/905/zi8kypob2j88g88546lrfvnzu09bcd1/Dissertatsiya-Nikolaev-I.A.pdf>

Автореферат разослан: « » _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.327.06
д.т.н., доцент



Краев Вячеслав Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации.

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.

Фреттинг-изнашивание является одним из распространенных, но недостаточно изученных видов изнашивания, которое служит причиной катастрофических отказов или потери функциональности во многих узлах трения. Так в газотурбинных двигателях (ГТД) к таким узлам относятся: замки лопаток вентилятора, компрессора и турбины, поворотные узлы направляющих аппаратов системы управления механизацией компрессора, бандажные полки лопаток, 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 и др.

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 фреттингостойкие покрытия, и в частности, твёрдые смазочные покрытия (ТСП), позволяет надеяться на повышение стойкости материалов к фреттинг-изнашиванию.

На основе анализа возможностей и перспектив, используемых ТСП и технологий их формирования в настоящее время эффективно используются различные плазменные методы их нанесения, реализуемые в различных средах: в вакууме, в жидкости (электролите) и в атмосфере.

В связи с изложенным **актуальность темы настоящей работы** определяется: 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), 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. Разработанные в диссертации методики и подходы к определению трибологических свойств твердых смазочных покрытий были использованы при проведении научно-исследовательских работ, связанных с

разработкой износо- и фреттингостойких покрытий в интересах ОКБ им. А.Льюльки филиал ПАО «ОДК-УМПО» и АО «ОДК-Авиадвигатель».

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 для повышения фреттингостойкости элементов ДЛА и ЭУ недостаточно исследованы, не в полной мере изучены процессы, особенности и условия их фреттинг-изнашивания, недостаточно разработаны опытные технологии и не определены материалы и конструкции ТСП, соответствующие разнообразным условиям их эксплуатации в составе 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, 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 фреттингостойкости и износостойкости элементов 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.

Новизна результатов исследований:

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 выполненной работы.

Методология и методы исследования.

Результаты работы получены при комплексном использовании аналитических и экспериментальных методов исследования. Выбор 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.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Результаты анализа фреттингостойкости, с оценкой по петлям фреттинг-гистерезиса энергий 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 и получаемых плазменными методами для использования в узлах трения ДЛА и ЭУ.

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

5. Результаты практической проверки в лабораторных условиях и

на реальных изделиях ТСП для защиты от фреттинг-изнашивания элементов ДЛА и ЭУ.

Вклад автора в проведение исследований.

1. В расчётно-аналитическую часть работы: разработка методики определения механизмов взаимодействия трущихся тел на основе оценки энергий диссипации при фреттинг-изнашивании, определении критериев перехода между этими механизмами с использованием коэффициентов и индексов скольжения, методики получения карт фреттинг-изнашивания применительно к сплавам, используемым в ДЛА и ЭУ, и к ТСП для выбранных условиях эксплуатации.

2. В экспериментальную часть работы: постановка и проведение всех экспериментальных исследований фреттингостойкости ТСП, модернизация специализированных машин трения, обработка и анализ полученных экспериментальных данных, передача результатов заказанных исследований во внешние организации.

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 чтения» (Москва, 2019, 2022г.).

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

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).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается общая характеристика работы, обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель работы и задачи для её достижения, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Представлены положения, выносимые на защиту, а также апробация результатов и публикации по теме диссертационной работы.

В первой главе рассматриваются базовые представления о фреттинге и методы защиты от него. Рассмотрены типичные области фреттинга в газотурбинном двигателе. Обоснован выбор твердых смазочных покрытий и

плазменных методов формирования покрытий для защиты от фреттинг-изнашивания.

Ресурс работы многих узлов трения ограничивается износом или разрушением контактирующих деталей вследствие развития процесса фреттинга при колебательном относительном смещении контактирующих поверхностей, вызванных вибрацией. Фреттинг может привести к образованию усталостных трещин в зоне трения, которые снижают предел выносливости на несколько порядков.

Традиционные твердые смазки и ТСП широко используются в ДЛА и ЭУ (дисульфид молибдена, серебро, свинец и др.). Но увеличение удельных параметров двигателя требует разработки новых твердых смазочных покрытий и методов их нанесения. Особенно большой интерес проявлен к плазменным и вакуумно-плазменным методам, что объясняется их широкими технологическими возможностями, позволяющими получать ТСП с любыми служебными свойствами, недостижимыми другими методами. Показано, что для формирования перспективных ТСП в рамках данной работы были обоснованно выбраны следующие плазменные методы: метод физического и химического осаждения из паровой фазы в вакууме, метод микродугового оксидирования в электролите и метод плазменного напыления в атмосфере.

Во второй главе проведен анализ процессов контактного взаимодействия при фреттинге (на примере контактной пары сфера/плоскость) и введены основные понятия, позволяющие анализировать процесс фреттинг-изнашивания. Определён механизм построения петель фреттинг-гистерезиса, рассмотрены их разновидности и роль в построении карт фреттинга и приложении к развитию энергетического подхода для прогнозирования объёмного износа при фреттинге. Определены коэффициент и индекс скольжения, как критерии, позволяющие определить режимы взаимодействия тел при фреттинг-изнашивании.

Показано, что для исследования фреттингостойкости материалов и покрытий можно воспользоваться модельным контактом, и в частности, контактом сфера/плоскость, который хорошо математически описан в модели Герца. Согласно этой модели, приложение нормальной нагрузки P к контакту сфера/плоскость приводит к параболическому распределению давления $p(r)$ с нулевым значением при $r=a$ и максимальным давлением при $r=0$ (рис. 1 а). При наличии трения появляется тангенциальная сила Q и сдвиговое усилие (сила сцепления) равная $q(r)=\mu \cdot p(r)$, где μ - статический коэффициент трения. При $Q \geq \mu \cdot P$ реализуется процесс полного скольжения, если $Q \leq \mu \cdot P$, то появляющаяся сила сцепления $q(r)$ уменьшает область скольжения, которая располагается между центральной областью схватывания (заедания) и краем контакта, как это показано на рис. 1 а. Радиус полуширины зоны схватывания обозначен как $\pm s$, а область скольжения лежит между a и s .

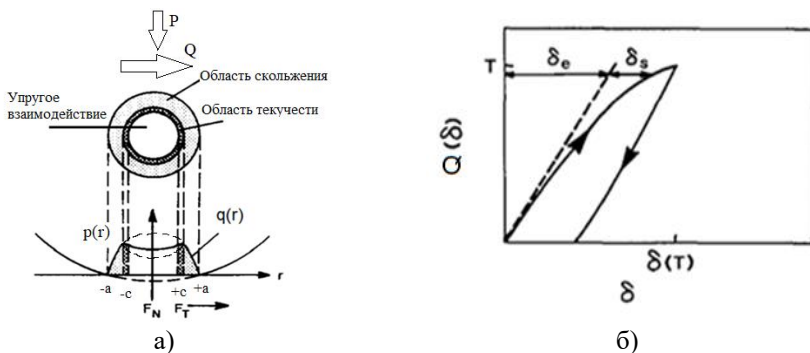


Рис. 1. Фреттинг сфера-плоскость с кольцом текучести (а) и половина цикла фреттинг-теста $Q-\delta$ (б)

Процесс фреттинга с учетом этой упругой модели Герца, развитой Миндлином, приводит к тому, что относительное смещение в контакте происходит в основном за счет микроскольжения на поверхности контакта и упругой деформации в объеме контактирующих тел, и при этом смещение отклоняется от упругой линии в каждой горизонтальной плоскости. Поэтому, в этом случае, суммарное смещение δ состоит из двух составляющих (рис.1 б): $\delta = \delta_e + \delta_s$, где δ_e - упругая (обратимая) составляющая, а δ_s - составляющая скольжения.

Таким образом в области $0 \leq Q \leq \mu \cdot P$ сила Q циклически переключаясь между двумя значениями силы трения T будет образовывать замкнутый контур, определяемый как петля фреттинг-гистерезиса. Площадь внутри петли – это энергия, рассеиваемая за цикл фреттинга, называемая энергией диссипации E_d .

Однако при экспериментах на металлах с разной твердостью и разной конфигурацией контактов значение E_d оказывалось значительно выше, чем предсказывает эта упругая модель. Это расхождение было объяснено упруго-пластическим поведением в зоне контакта, а именно тем, что некоторые неровности поверхности выходят из зацепления пластически (не ломаясь).

Появление пластической деформации показано на рис.1а в виде заштрихованного кольца текучести, и согласно этой упруго-пластической модели Герца-Миндлина-Вингсбо в величину δ добавляется пластический элемент δ_p и тогда суммарное смещение будет иметь вид: $\delta = \delta_e + \delta_s + \delta_p$. Это выражение и определяет в итоге реальное смещение в экспериментально получаемых зависимостях $Q-\delta$, представляющих собой петли фреттинг-гистерезиса.

Анализ экспериментально полученных нами петель фреттинг-гистерезиса позволил установить, что их форма, как показано на рис.2, связана с основными режимами фреттинга и переходами между ними: режим упругого взаимодействия (отсутствие гистерезиса) показан рис. 2 а, режим частичного скольжения (эллиптический гистерезис) показан на рис. 2 б, режим фреттинга с полным скольжением (параллелограммный гистерезис) показан на рис 2 в и возвратно-поступательный режим скольжения (прямоугольный гистерезис) на рис. 2 г. При этом для частичного скольжения характерен умеренный износ, но

чаще может наблюдаться зарождение и распространение трещин, в то время как сильное изнашивание с преобразованием поверхности, износ и удаление материала из области контакта больше связано с фреттингом в режиме полного скольжения.

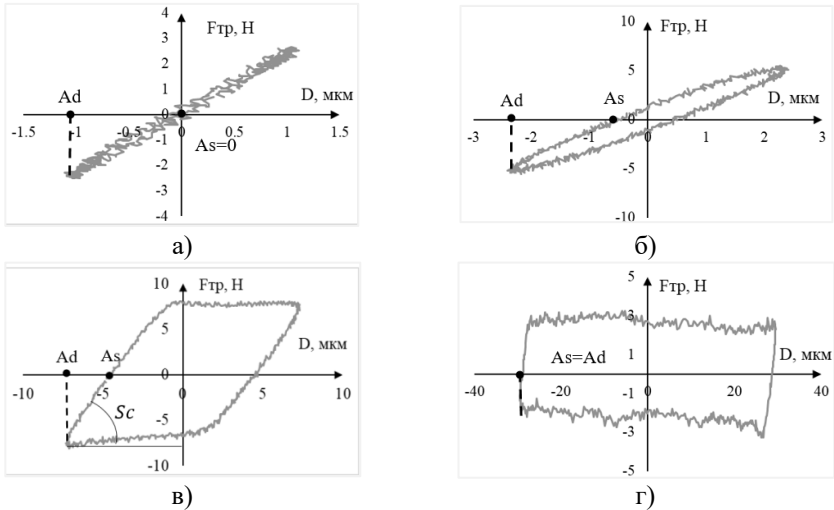


Рис. 2. Изменение сил трения $F_{тр}(Q)$ в зависимости от относительного смещения δ

Используя обозначения, принятые на петлях на рис.2. можно определить коэффициент скольжения s , как отношение амплитуды скольжения A_s и амплитуды смещения A_d : $S=A_s/A_d$ и индекс скольжения равный $\delta c = A_d \cdot S_c / P$, где S_c - упругий наклон петли, соответствующий комбинированной жёсткости контактная и основания машины трения. Использование индекса скольжения позволяет уйти от понятия «малой» амплитуды в определении фреттинга, а рассматривать его как относительное движение между двумя поверхностями, имеющее неравномерное распределение локального относительного смещения в месте их контакта.

На рис.3 показано графическое изображение режимов фреттинга на примере контакта сфера-плоскость, а также диапазон коэффициента скольжения для каждого из режима.

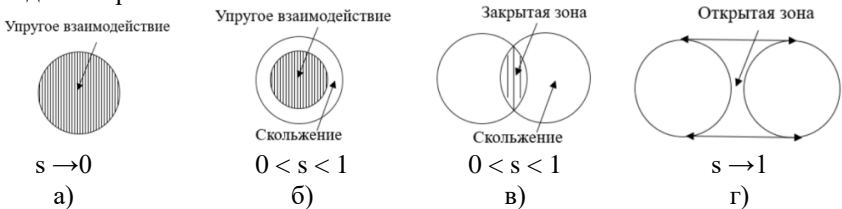


Рис. 3. Виды контактного взаимодействия сфера-плоскость

Петли фреттинг-гистерезиса позволяют при варьировании такими параметрами, как амплитуда перемещения, контактное давление, частота колебаний, параметры внешней среды и наличие смазки и твердых смазочных покрытий в том числе, строить различные карты фреттинга для данного фреттинг-контакта.

Карты фреттинга, построенные в координатах нормальная нагрузка (Н) величина смещения (мкм), показывают соответствующие режимы фреттинг-изнашивания, определяют границы перехода от одного режима к другому.

В рамках рассматриваемого энергетического подхода отношение измеренного объемного износа материала W_v (мкм³) к суммарной рассеянной энергии ΣE_d (Дж) при неизменном механизме разрушения является постоянной величиной, определяется как $\alpha = W_v / \Sigma E_d$ и носит название коэффициента объемного износа.

В третьей главе представлены материалы подложек, дано описание плазменных установок, используемых для формирования ТСП, представлено оборудование для определения свойств и фреттингостойкости покрытий.

Для исследований в качестве подложек использовались различные материалы: титановые сплавы ВТ6 и ВТ9, нержавеющая сталь 95Х18 и алюминиевые сплавы АМГ6 и АД1, выбор которых обусловлен частотой из использования в составе ДЛА и ЭУ. Керамика SiAlON рассматривалась как перспективный материал для использования в составе теплонапряжённых узлов трения ГТД. Образцы получали механической обработкой из заготовок в состоянии поставки и представляли собой диски или пластины.

Технологические процессы и установки формирования ТСП.

Для формирования тонкопленочных покрытий на титановом и нержавеющем сплаве методом магнетронного распыления (МРС) использовалась установка УВМ-700-4М (каф. ТиСАПРМП МАИ). Нанесение толстослойных плазменных ТСП осуществлялось атмосферным плазменным напылением на установке ООО «ТСЗП». Покрытия на керамической подложке SiAlON были получены на комбинированной установке Platit PI 311 (МГТУ «СТАНКИН») методом осаждения в вакуумной дуге - CAD и химическим осаждением из пара с плазменным сопровождением – PACVD. Формирование керамических покрытий на алюминиевых сплавах проводилось на установке микродугового окисления - МДО, в лаборатории кафедры 205 «Плазменные технологии покрытий».

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

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

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.

Структура и химический состав. Элементный состав и морфология разработанных покрытий и поврежденных поверхностей после трибологических испытаний проводилась на сканирующем электронном микроскопе EVO-40 CarlZeiss с приставкой для энергодисперсионного анализа INCA (Oxfordinstr.).

Фреттингостойкость и износостойкость образцов определялась на специальных машинах трения (1401 и 3308), в которых были реализованы режимы фреттинга с различными типами контакта.

Машина трения 1401 (рис.4) позволяла реализовывать следующие параметры испытаний на фреттинг-износ: нормальная нагрузка до 200 Н, частота до 100 Гц, амплитуда от 2 мкм до 500 мкм и испытывать образцы в четырех режимах: упругое взаимодействие, частичное скольжение, полное скольжение и возвратно-поступательное скольжение.

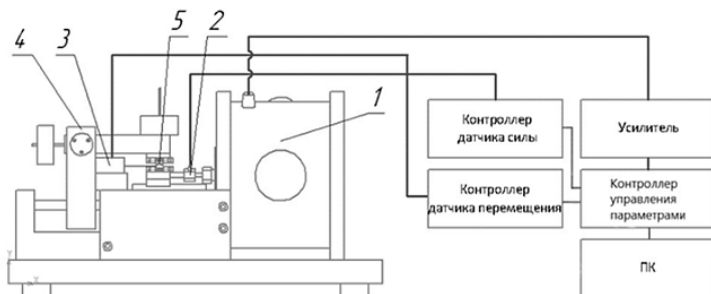


Рис. 4. Схема машины трения 1401

Машина состоит из электромагнитного вибратора 1, обеспечивающего перемещение одного из образцов. Система нагружения в виде уравновешиваемого балансом рычага 4, передаёт в зону контакта 5 нормальную нагрузку, которая регулируется грузами различной массы. Системы регистрации и контроля параметров эксперимента включает: усилитель синусоидального сигнала (ММФ VEB METRA) и систему регистрации и контроля параметров: пьезоэлектрический датчик силы 2 PCB Piezotronic 208B ($F_{max} = \pm 200\text{Н}$) и контроллер сигнала PCB Piezotronic 482A22, лазерный датчик перемещения 3 Keyence LC2420 ($D_{max} = \pm 250\text{мкм}$, $\Delta = 0,01\text{мкм}$) с контроллером Keyence LC2400A. Для контроля и мониторинга параметров трибологических испытаний на фреттинг – изнашивание использовалось специальное программное обеспечение, установленное на контроллере NI myRIO. На программное обеспечение было получено свидетельство о государственной регистрации.

Машина трения 3308 (рис. 5) 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.

Вал эксцентрикового механизма этой машины приводится в движение электродвигателем. Определение величины возвратно-поступательного

перемещения образцов, в зависимости от величины установленного эксцентриситета, производится лазерным триангуляционным датчиком РФ603НС ($D_{max} = \pm 2,5\text{мм}$, $\Delta = 5\text{мкм}$), размещенной на нижнем рычаге 9. Измерение коэффициента трения производилось с помощью пары трехосных пьезоэлектрических датчиков силы Kistler 9027С (диапазон измерения от 0...4кН), закрепленных в верхнем рычаге машины трения 10 по схеме, рекомендованной производителем датчиков. Так же в состав машины входит система регистрации и записи аналоговых сигналов с датчика силы и лазерного датчика на основе осциллографа АКИП 4115/ 1А с программным обеспечением EasyScope.

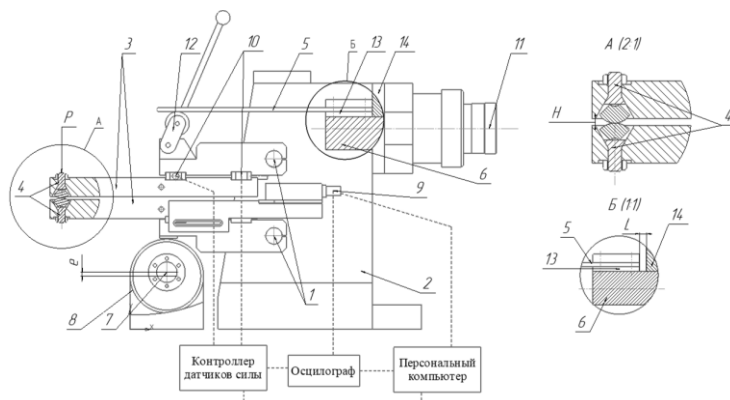


Рис. 5. Схема машины трения 3308.

В четвертой главе приведены результаты исследования и анализа характеристик ТСП, полученных различными плазменными методами, а также приводится разработанная и проверенная на практике методика выбора ТСП, стойких к фреттинг-изнашиванию.

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

Повышение твердости титановых сплавов, широко используемых в ГТД, не гарантирует, как известно, длительный срок службы или низкое трение поверхностей деталей, выполненных из них. Поэтому в этой работе внимание было уделено покрытию, которое основано на сочетании твердой и мягкой фаз. Проведенные ранее исследования показали возможность легирования твердой матрицы TiN мягкой фазой Pb с целью уменьшения величины износа покрытия TiN, сформированного ранее реактивным распылением в МРС из мозаичной мишени. 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.

Методом реакционного магнетронного распыления постоянного тока из двух отдельных мишеней Ti и Pb были получены композиционные покрытия TiN-Pb на подложке из титанового сплава ВТ6. Содержание свинца в исследуемых покрытиях варьировалось от 5 до 22% ат.

Было проведено исследование данных покрытий на фреттинг-изнашивание на машине трения 1401 с целью определения оптимального значения свинца Рb в покрытии и обеспечения минимального объемного износа.

В этих исследованиях частота относительного перемещения образцов на 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. Все эксперименты проводились в лабораторных условиях: температура окружающей среды – 23°C, влажность – 30%. При этом покрытия не были изношены до подложки.

Сравнение на базе в $N_{ц} = 5 \cdot 10^4$ циклов величин объёмного износа $W_v, \text{мкм}^3$ образцов с покрытиями TiN-Pb с разным содержанием свинца показана на рис.6. Из этой зависимости следует, что для композиционного покрытия TiN-Pb получено и подтверждено оптимальное значение свинца в составе покрытия, лежащее в диапазоне 5-10 % ат. Дальнейшее увеличение свинца в покрытии не приводило к улучшению фреттингостойкости, а значительно повышало его износ, снижая время работы покрытия.

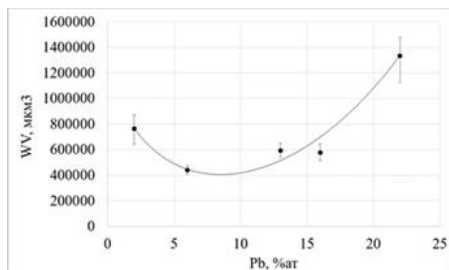
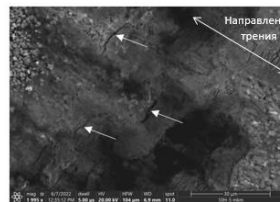
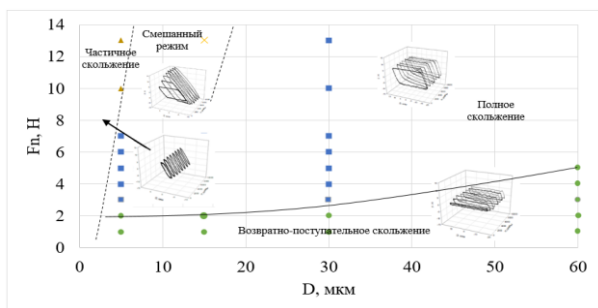


Рис. 6. Зависимость объёмного износа $W_v, \text{мкм}^3$ от % ат содержания Рb в покрытии.

Для покрытия TiN-Pb (16% ат.) была построена полная карта фреттинга (рис.7) и для режимов частичного скольжения (а) и смешанного режима (б) впервые была получена сложная картина разрушения покрытия, включающая в себя одновременно образование микротрещин и износ.



а)



б)

Рис. 7. Карта фреттинга условий работы ТСП системы TiN-Pb.

Зависимость характеристик фреттинг-изнашивания ТСП, полученных методами САД и РАСВД. Среди керамических материалов, предлагаемых к использованию в перспективных ГТД, был рассмотрен SiAlON, представляющий собой твердый раствор из нитрида кремния, полученный замещением атомов кремния алюминием и атомов азота кислородом. Этот материал обладает стабильностью при высоких температурах, высокими твердостью и прочностью.

Однако эта керамика имеет высокий коэффициент трения, поэтому в данной работе оценивалась возможность улучшения ее трибологических свойств в условиях фреттинга с помощью использования двухслойного покрытия (Cr,Al,Si)N/DLC, подслоя этого покрытия (Cr,Al,Si)N формировался с целью снижения внутренних напряжений в покрытии, алмазоподобное внешнее покрытие (DLC) легировалось кремнием для улучшения его термостойкости.

Оценка трибологических свойств покрытий (коэффициент трения и фреттингостойкость) проводилась на машине трения 1401. В качестве модельного контакта использовалась схема сфера/плоскость, при этом сферой служил шарик из ШХ-15 (Ø12,6 мм), а плоскостью – образец из SiAlON диаметром 20 мм и толщиной 9 мм с различными покрытиями, отличающимися содержанием кремния Si_{во} внешнем DLC слое покрытия. Частота относительного перемещения образцов на этом этапе исследований f была принята равной 100 Гц, в большинстве экспериментов образцы совершали N_ц=5·10³ циклов, при значениях перемещений D=15 мкм и нормальной силы в контакте F_n=10 Н. Все эксперименты проводились в лабораторных условиях: температура окружающей среды – 23°С, влажность – 30%. Содержанием кремния в испытуемых покрытиях представлено в таблице 1. Диаграмма сравнения величины объёмного износа покрытий, измеряемого в конце испытаний, представлена на рис. 8.

Таблица 1. Типы покрытий на керамических образцах

№ образцов	№1	№2	№3	№4	№5	№6
% Si в покрытии	-	0,8%	3%	5%	7%	10%

В результате впервые было установлено что содержание кремния Si в объеме 3 мас.% является оптимальным не только с точки зрения повышенной термостойкости покрытия (как было установлено ранее), но и с точки зрения достижения высоких характеристик фреттингостойкости.

Измерения объёмного износа и анализ пятен износа подтвердили этот результат.

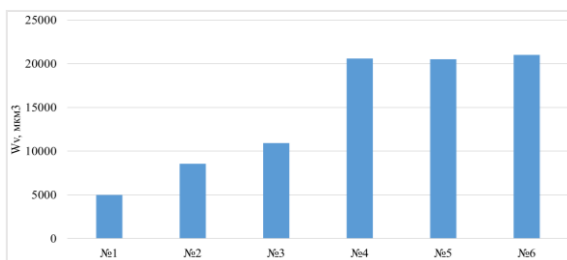


Рис. 8. Диаграмма сравнения объёмного износа покрытий

Анализ фреттингостойкости ТСП, сформированных методом микродугового оксидирования (МДО). В настоящей работе был использован метод микродугового оксидирования (МДО), позволяющий формировать керамикоподобные покрытия, которые по своим характеристикам превосходят покрытия, получаемые при анодировании.

В качестве исходного материала был выбран алюминиевый сплав АМг-6. 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 $S_{\text{КОН}} = 1 \text{ г/л}$, $C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3} = 6 \text{ г/л}$. 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.

Основной результат этих исследований заключался в построении и анализе карт фреттинга. При анализе петель гистерезиса и пятен износа в принятых условиях нагружения для пары трения АМг-6/ АМг-6 было обнаружено два основных режима изнашивания (рис. 9): режим частичного скольжения ($Q < \mu \cdot P$), характеризующийся грубым повреждением поверхности, близким к схватыванию, и режим полного скольжения ($Q \geq \mu \cdot P$), характеризующийся квази-прямоугольными петлями с сильно меняющейся максимальной тангенциальной силой в конце цикла (так называемые «крючки»), что связано с взаимодействием контртела с фронтальным пластическим скоплением материала на периферии пятна износа. Формирование ТСП на основе МДО покрытий на поверхности сплава АМг-6 позволило при тех же режимах испытаний частично перевести процесс в режим возвратно-поступательного скольжения (рис. 10) и значительно повысить фреттингостойкость сплава АМг-6.

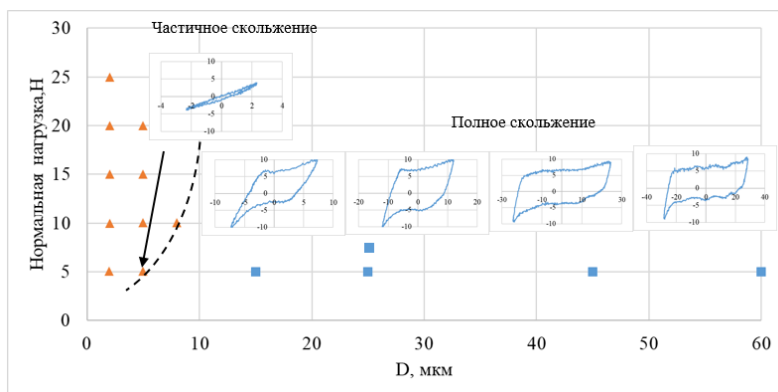


Рис. 9. Карта фреттинга пары трения АМг-6/ АМг-6

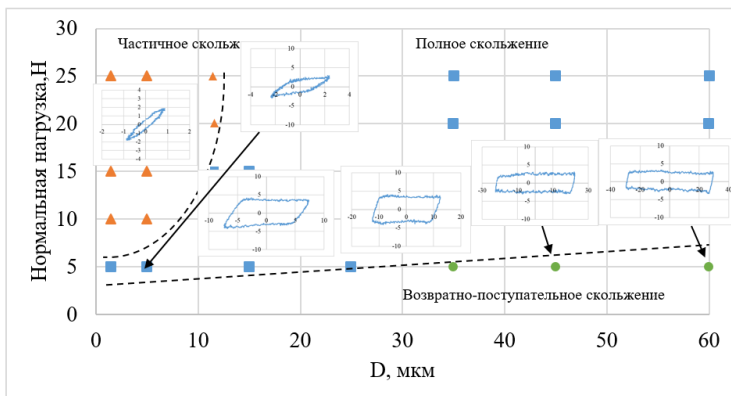


Рис. 10. Карта фреттинга пары трения МДО на сплаве АМг-6/ Al_2O_3 (б).

Таким образом исследование керамикоподобного ТСП, полученного методом МДО, показало, что формирование такого покрытия на алюминиевом сплаве АМг-6 позволяет избежать схватывания в контакте, а также существенно уменьшить износ пары трения путём снижения коэффициента трения в 3,5 раза с 0,25 до 0,07.

Влияние графита и MoS_2 в ТСП, полученных атмосферным плазменным напылением, на их фреттингостойкость. Проведенный анализ показал, что кроме использования тонкопленочных покрытий, получаемых ионно-плазменными методами, для защиты титановых сплавов можно применять относительно толстые (до 200...300 мкм) ТСП, формируемые в виде многослойной конструкции.

В рамках данной работы при исследовании фреттингостойкости было использовано покрытие следующей конструкции: NiAl – CuNiIn – Ni[Cg] + коллоидный графит (пропитка)+ MoS_2 . Прототип этого покрытия представлен на рис. 11.

Проведенная работа заключалась в исследовании этого покрытия на новых режимах с анализом влияния амплитуды возвратно-поступательного перемещения на фреттингостойкость покрытий по схеме цилиндр/ цилиндр на модернизированной 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. В рамках данной работы рассматривались покрытия, состав которых представлен в Таблице 2.

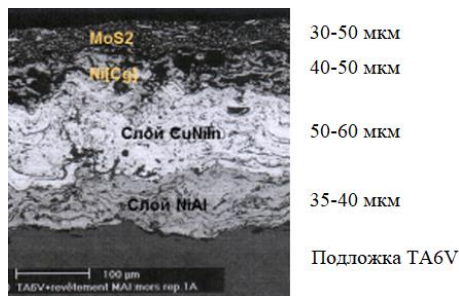


Рис. 11. Покрытие – прототип

Таблица 2. Составы антифреттинговых покрытий для сравнительных испытаний.

№ покрытия	Слой 1	Слой 2	Слой 3	Слой 4	Слой 5
1	NiAl	CuNiIn	Ni[Cg]	-	
2	NiAl	CuNiIn	Ni[Cg]	-	Molykot 106
3	NiAl	CuNiIn	Ni[Cg]	Коллоидный графит	Molykot 106

В соответствии с энергетическим подходом, который связывает объем износа разрушенного материала с накоплением суммарной энергии диссипации в зоне контакта, для трех покрытий 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 (рис.12).

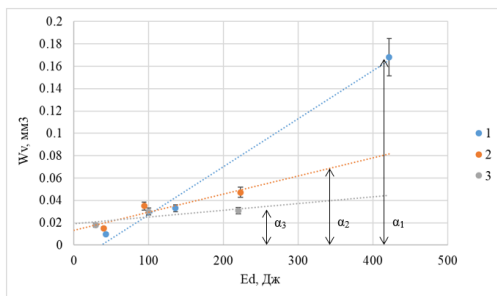


Рис. 12. Коэффициент объемного износа покрытий в зависимости от энергии диссипации

Методика выбора ТСП, стойких к фреттинг-изнашиванию.

Проведенные исследования позволили на основе анализа результатов исследования по фреттингостойкости ТСП, полученных в настоящей работе различными плазменными методами, разработать методику выбора ТСП, стойких к фреттинг-изнашиванию.

Эта методика содержит следующие основные условия и требования:

- 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_c ;
- технические требования к ТСП, определяемые условиями работы фреттинг-контакта, куда входят значения P , f , D , N_c ;
- анализ данных по материалам, конструкциям и методам формирования ТСП, с оценкой применительно к условиям фреттинга системы ТСП, представляющую собой комбинацию определенной подложки с определенным покрытием для заданных условиях нагружения в контакте трения.

Анализ ТСП, используемых и предлагаемых к использованию для повышения фреттингостойкости и близких по условиям эксплуатации к двигателям и энергоустановкам летательных аппаратов показал, что трибологическое поведение таких покрытий определяется их конструкцией, и проектирование ТСП должно осуществляться с учетом анализа условий их работы, обоснованно выбранных материалов, входящих в состав покрытия, и технологии их формирования, в частности с использованием перспективных методов плазменных технологий.

Основным элементом этой методики, как показано на рис.13, является использование и анализ экспериментально получаемых петель фреттинг-гистерезиса, построение карт фреттинга и использование энергетического подхода. Оценка коэффициента s и индекса δ скольжения, величины энергетического коэффициента, равного отношению энергии диссипации к затраченной энергии E_d/E_t позволяют оперативно определять режимы трения фреттинга и особенно границы перехода между этими режимами.

Завершается эта методика прогнозированием фреттинг-изнашивания ТСП с помощью коэффициента объемного износа α , равного отношению измеренного объемного износа материала W_v , мкм^3 к суммарной рассеянной энергии за весь эксперимент. Блок схема методики определения ТСП, стойких к фреттинг-изнашиванию, показана на рис. 13.

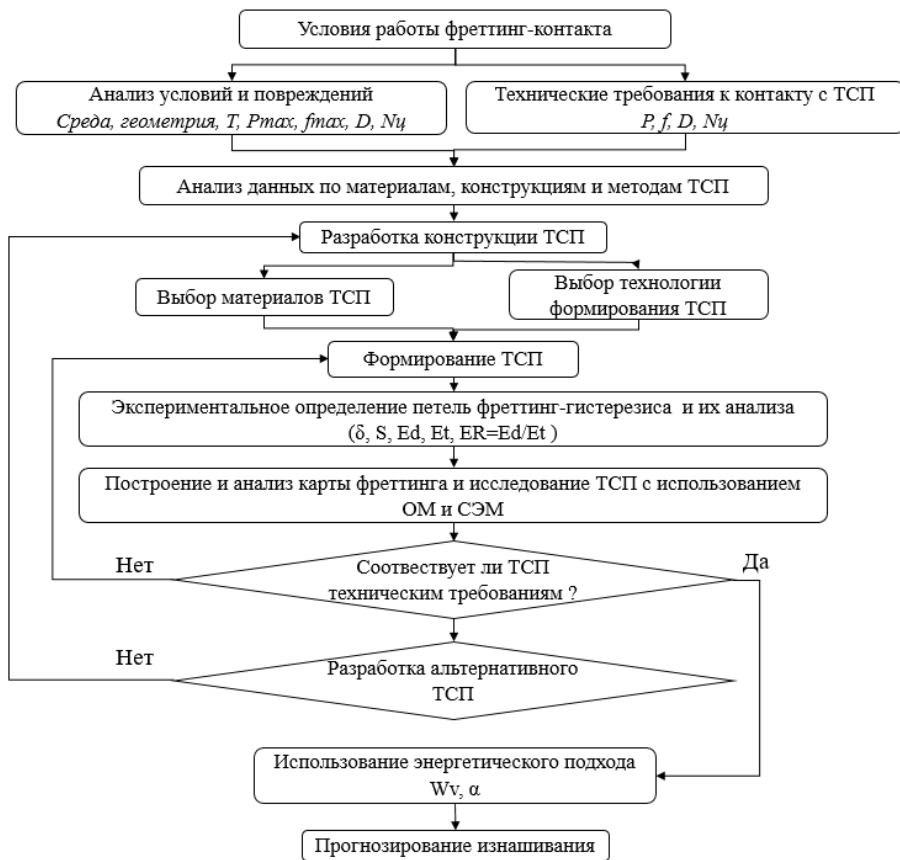


Рис. 13. Методика выбора ТСП, стойких к фреттинг-изнашиванию

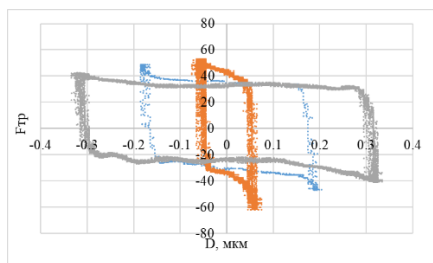
В пятой главе приводятся результаты разработки и рекомендации по практическому использованию результатов исследований.

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

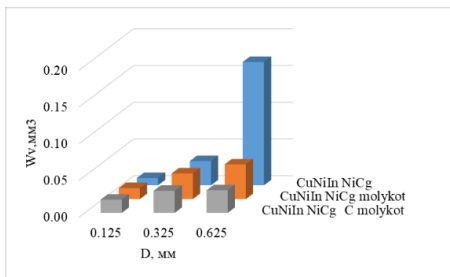
Были проведены сравнительные испытания трех модификаций антифрикционных многослойных покрытий, полученных атмосферным плазменным напылением: первая модификация состояла из трех слоев NiAl-CuNiIn и Ni[Cg]; во второй был дополнительно нанесен слой Molykote 106, а в третьей, помимо слоя Molykote 106, слой Ni[Cg] был дополнительно пропитан раствором коллоидного графита.

Было изготовлено 30 образцов из материала хвостовика лопаток вентилятора из титанового сплава ВТ6. Испытания на фреттингостойкость были проведены при следующих условиях нагружения: контактное давление 300 кгс/см², частота колебаний образцов 10 Гц, температура испытаний 20-30 °С, относительное перемещение при фреттинге 200 мкм, временные базы испытаний 15 минут и 15 часов, материал контртела ВТ6 без покрытия, образец из ВТ6 с ТСП, реализуемый тип контакта цилиндр-цилиндр, вид движения возвратно-поступательное.

Типичные петли для величин смещения 0,125, 0,325 и 0,625 мм и соответствующие им значения величин объемного износа W_v , мм³ трех исследованных ТСП представлены на рис.14.



а)



б)

Рис. 14. Петли фреттинг-гистерезиса для трех величин смещения (а) и значения величин объемного износа (б) W_v , мм³ разработанных ТСП.

По результатам проведенных испытаний были сделаны выводы о том, что включение в состав покрытия полимерного ТСП типа Molykot 106 положительно влияет на работоспособность и фреттингостойкость всех исследованных пар трения. На основании полученных результатов в ООО «ТСП» переданы реальные вентиляторные лопатки для отработки технологии нанесения равномерного многослойного ТСП на поверхность хвостовиков для последующих испытаний в штатных условиях эксплуатации на технологическом двигателе.

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». В соответствии с техническим заданием объектом исследования являлся поворотный узел направляющего аппарата компрессора низкого давления (НА КНД) 1-й ступени, состоящий из внутренней титановой втулки ВТ9 (альфированной) и внешней никелевой втулки ВЖЛ1 (рис. 15).

Перечень исследуемых покрытий представлен в Таблице 3. 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 и после испытаний.

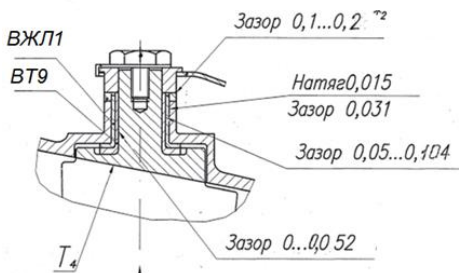


Рис. 15. Принципиальная схема работы пары трения

Таблица 3. Перечень сплавов и образцов в парах трения.

Пара трения	Образец (Внутренняя втулка)	Образец (Внешняя втулка)	Изготовитель
1.	ВТ9 (Ni[Cg]+MoS ₂)	ВЖЛ1 (С1)	МАИ
2.	ВТ9 (TiN-Pb)	ВЖЛ1 (Мо)	МАИ-ТСТ
3.	ВТ9 (альфированный)	ВЖЛ1 (С1)	ОКБ им. А. Люльки

Проведенные испытания на образцах показали, что покрытие TiN-Pb позволила снизить износ модельных образцов в два раза по сравнению со штатной технологией, а применение толстослойного покрытия МАИ (Ni[Cg]+MoS₂) позволило значительно снизить величину износа в 25 раз.

Полученные результаты исследований были использованы в поисковых исследованиях ОКБ им. А. Люльки и позволили рекомендовать «толстые» плазменные покрытия для защиты от износа и фреттинг-износа.

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 ПАО РКК «Энергия» им. С.П. Королева была решена задача по исключению процесса заедания (схватывания) резьбовых деталей, а именно гидравлических разъемов системы терморегулирования, выполненных из сплава АМг-6.

Опыт, полученный при исследовании фреттингостойкости МДО покрытий на алюминиевом сплаве АМг-6 позволил разработать и применить для этой цели технологический процесс формирования МДО покрытия.

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

В результате с помощью метода МДО было сформировано керамическое покрытие на гайке толщиной от 78 до 120 мкм (рис. 16), при толщине основного слоя, сформированного в теле материала от 48 до 52 мкм.

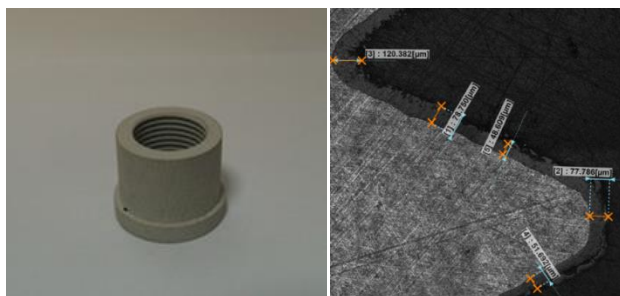


Рис. 16. Резьбовая деталь с керамическим покрытием.

Согласно заключению ПАО РКК «Энергия», полученные МДО покрытия после отработки технологии контролируемого удаления внешнего (технологического) рыхлого слоя рекомендованы к использованию в мало- и средненагруженных парах трения, в том числе работающих в средах с низким смазывающим эффектом.

Опытный технологический процесс и технологическая оснастка формирования МДО покрытия на внутреннюю поверхность теплового насоса малого диаметра в СОТР КА. Для решения этой задачи из АО ГНЦ «Центр Келдыша» на каф.205 МАИ были переданы корпуса капиллярных насосов контурной тепловой СОТР КА.

Было сформировано диэлектрическое износостойкое покрытие внутри трубки малого диаметра ($\text{Ø}=10 \text{ мм}$) для реализации последующего электроимпульсного спекания в ней карбонильного порошка в условиях прессования. Для этого был спроектирован и изготовлен стенд для прокачки электролита со специальным приспособлением для корпуса насоса. Приспособление состояло из фланца, напечатанного на 3D принтере, и нержавеющей электрода, установленного внутри корпуса.

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 КОН = 1 г/л, $\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 6 \text{ г/л}$. В результате было сформировано керамикоподобное покрытие на внутренней поверхности трубки (рис.17) малого

диаметра суммарной толщиной 70 мкм, толщина основного слоя составляла 37 мкм.

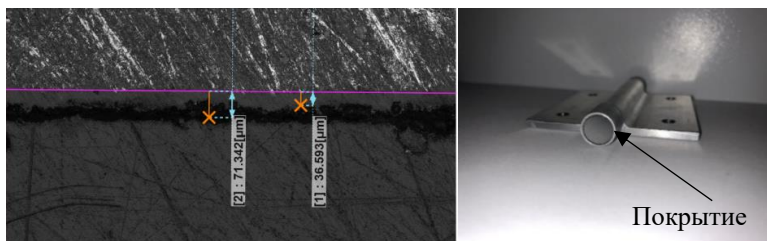


Рис. 17. Корпус капиллярного насоса с керамическим покрытием.

В акте об использовании результатов этого исследования отмечено, что выполненные разработки были использованы в поисковых исследованиях и разработках АО ГНЦ «Центр Келдыша».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе работы получены следующие результаты:

1. Для защиты от фреттинг-изнашивания обоснован выбор твёрдых 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.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях и публикации, приравненные к ним

1. 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

2. 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.

3. Лесневский Л.Н., Ляховецкий М.А., Николаев И.А., Волосова М.А. Трибология многослойных композиционных твердых смазочных покрытий на силоне для использования их в узлах трения ГТД // Вестник УГАТУ. 2022. Т. 26. №. 2 (96). С. 13-23.

4. 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.26. №. 3 (96). С.66-77.

Другие публикации

1. 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.

2. Lesnevskiy L., Lyakhovetskiy M., Lozovan A., Nikolaev I. Tribological properties of TiN-Pb systems solid lubricant coatings with various morphologies // Journal of Physics: Conference Series, 2019 1281 012049 -6p. DOI:10.1088/1742-6596/1281/1/012049

3. Lyakhovetskiy M., Lesnevskiy L., Lozovan A., Nikolaev I., Pavlov

Y. Tribological properties of solid lubricating coatings of the TiN-Pb system at various Pb content// Journal of Physics: Conference Series, 2020. 1713 012029-7p.DOI:10.1088/1742-6596/1713/1/012029