

На правах рукописи



Рыков Евгений Валентинович

**ВЛИЯНИЕ СОСТАВА И СВОЙСТВ АЛЮМИНИЕВЫХ
СПЛАВОВ И ПАРАМЕТРОВ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ
МИКРОДУГОВЫМ ОКСИДИРОВАНИЕМ, НА
ХАРАКТЕРИСТИКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДЕТАЛЕЙ
КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ**

Специальность

2.6.17. «Материаловедение» (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва, 2023 г.

Работа выполнена на кафедре «Материаловедение и технология обработки материалов» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» и в секторе конструирования наземных систем филиала Акционерного общества «Научно-производственное объединение имени С. А. Лавочкина», г. Калуга

Научный руководитель: – доктор технических наук, профессор
Мамонов Андрей Михайлович

Официальные оппоненты: – **Дьяков Илья Геннадьевич**,
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Костромской
государственный университет», профессор

– **Аубакирова Вета Робертовна**,
кандидат технических наук,
ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки
и технологий», доцент

Ведущая организация: – ФГБОУ ВО «Московский государственный
технологический университет «СТАНКИН»

Защита состоится «18» июля 2023 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.327.04 (Д 212.125.15) в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», по адресу: 121552, г. Москва, ул. Оршанская, д. 3, ауд. 307Б. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3, МАИ, ученому секретарю диссертационного совета Скворцовой Светлане Владимировне и по электронной почте skvortsovasv@mai.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Университета и на сайте <https://mai.ru/upload/iblock/94d/2hkhpXswhxolqo31n4qz508p2ajjtx50/Dissertatsiya-Rykov-MAI-s-podpisyu.pdf>

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета

Скворцова С.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время одной из важных задач материаловедения является повышение эксплуатационных свойств поверхностных слоёв, сформированных на металлических элементах, контактирующих между собой и подвергающихся интенсивным динамическим нагрузкам. Особенно актуальна эта задача для узлов автоматических космических аппаратов (далее – КА), обслуживание которых в процессе эксплуатации невозможно. Разрушение защитных покрытий арретированных элементов на этапе выведения ракетой-носителем (РН) в космическое пространство может привести в условиях вакуума к взаимной адгезии контактирующих поверхностей и потере работоспособности.

Создание покрытий, стойких к фрикционным и вибрационным нагрузкам и препятствующих адгезии, исследование их физико-механических свойств весьма актуально для узлов раскрытия КА с длительным ожиданием активации. Главным фактором, определяющим успешное решение задачи, является разработка покрытия, эксплуатационные характеристики которого обеспечивают требуемые защитные свойства поверхности. Способ формирования, режимы его реализации, структура и фазовый состав должны обеспечить требуемые механические и трибологические свойства.

Согласно исследованиям Европейского космического агентства, нанесение тонких (до 30 мкм) пленок из нитридов титана и циркония, а также использование смазок на основу MoS_2 с высокой несущей способностью, оказались недостаточными для предупреждения адгезии контактирующих поверхностей после фреттингового воздействия, в то время как покрытие Keronite, полученное микродуговым оксидированием (МДО) на алюминиевом сплаве AL2219, показало в тех же условиях снижение усилия адгезии более чем в 20 раз по сравнению с вариантом без покрытия.

Однако публикаций по исследованию стойкости МДО-покрытия к комбинированному воздействию, включающему фреттинг-износ и микроудар, в настоящее время не имеется. Таким образом, существует объективное несоответствие между потребностями в практике применения МДО-покрытий,

стойких к комбинированному фреттинговому и вибрационному воздействию, и уровне развития теории по оценке влияния свойств алюминиевых сплавов и параметров МДО-покрытий на величину износа. Поэтому проведение системных материаловедческих исследований в данной области весьма актуально для решения прикладных задач при проектировании КА

Объектами исследования являются МДО-покрытия, сформированные на алюминиевых сплавах АМг6.М, Д16.А.Т, 01570.

Цель и задачи работы. Целью диссертационной работы является научно-методическое обоснование и определение влияния геометрических параметров и физико-механических свойств контактирующих элементов, один из которых выполнен из алюминиевого сплава с МДО-покрытием, на их сопротивление комбинированным вибрационным (микроударным) и фрикционным воздействиям и антиадгезионную способность в условиях, близких к условиям выведения КА на орбиту.

Для этого необходимо решить следующие задачи:

1. Обобщение и анализ результатов исследований в области создания покрытий, препятствующих адгезии элементов из различных материалов в условиях космоса.
2. Проведение анализа технологий формирования МДО-покрытий необходимой толщины на алюминиевых сплавах.
3. Математическое описание взаимодействия контактирующей пары узла раскрытия КА при вибрационных и фреттинговых воздействиях.
4. Разработка документации и изготовление установки для экспериментального исследования взаимодействия контактирующей пары узла раскрытия КА при вибрационных и фреттинговых воздействиях.
5. Установление механизма изнашивания и разрушения МДО-покрытий, сформированных на алюминиевых сплавах, при вибрационных и микроударных нагрузках.
6. Установление влияния свойств алюминиевых сплавов, толщины и зонной структуры МДО-покрытия и площади контакта с индентором на глубину и характер износа покрытия.

Научная новизна работы.

1. Впервые, на основании анализа процессов, происходящих при вибронагружении контактирующих элементов узлов раскрытия КА, установлено явление комбинирования нагрузок микроудара и фреттинга на МДО-покрытиях алюминиевых сплавов АМг6.М, Д16.А.Т, 01570 в диапазоне толщин 50-150 мкм.
2. Предложена математическая зависимость величины износа образца с МДО-покрытием от параметров покрытия (контактной прочности, пористости), твердости материала основы, радиуса сферы воздействующего индентора и условий нагружения, характеризующая физические процессы, происходящие при разрушении МДО-покрытия в условиях комбинированного виброударного и фреттингового воздействия.
3. Впервые получены экспериментальные данные по глубине и площади износа МДО-покрытий, сформированных в щелочном электролите (КОН - 2 г/л; $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ - 12,5 г/л) на алюминиевых сплавах АМг6.М, Д16.А.Т, 01570 в диапазоне толщин 50-150 мкм, при вибрационном нагружении, соответствующем нагружению узлов КА при выведении на РН.
4. Показано, что увеличение твердости алюминиевого сплава-основы у образцов с МДО-покрытием толщиной 50-150 мкм, повышает стойкость к износу при комбинированном воздействии микроударного нагружения и фреттинга на режимах, аналогичных режимам выведения КА.
5. Экспериментально установлена зависимость степени износа от толщины МДО-покрытия на образцах из алюминиевых сплавов АМг6.М, Д16.А.Т, 01570 при комбинации воздействия микроударного нагружения и фреттинга. Наибольшую стойкость к износу демонстрируют образцы из сплава Д16.А.Т при следующих параметрах формирования МДО-слоя: толщина - 120 мкм, электролит КОН - 2 г/л; $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ - 12,5 г/л, электрические параметры режима нанесения $I_k/I_a=1,0 \dots 1,1$, $J=10,5 \dots 11,0$ А/дм², время обработки 600 мин. Увеличение толщины покрытия с 50 до 120 мкм для данного сплава приводит к снижению глубины износа образца на 49 %, дальнейшее увеличение толщины покрытия приводит к экспоненциальному росту глубины износа образца.
6. Экспериментально выявлено, что влияние радиуса сферического индентора на износ МДО-покрытия при комбинированном микроударном нагружении и

фреттинге описывается уравнением кубической регрессии. Наименьший износ выявлен на сплаве Д16.А.Т при воздействии сферического индентора диаметром 16,6 мм.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Результаты расчётов величины износа по предложенной математической зависимости от параметров МДО-покрытия, свойств материала основы и условий нагружения виброударного и фреттингового характера, удовлетворительно коррелируют с полученными экспериментальными данными по величине износа МДО-покрытий на алюминиевых сплавах АМг6.М, Д16.А.Т, 01570 при вибрационном нагружении, соответствующем нагружению узлов КА при выведении на РН. Это позволяет теоретически определять необходимые параметры антиадгезионных покрытий для задаваемых эксплуатационных режимов.
2. Выявленная зависимость площади контакта элементов и износа МДО-покрытия при комбинированном микроударном нагружении и фреттинге позволяет теоретически определить геометрические параметры разрабатываемых контактирующих элементов КА.
3. Разработан способ снижения износа в контактирующих элементах узлов раскрытия КА на этапе выведения и последующей защиты от адгезии с применением МДО-покрытия на алюминиевых сплавах.
4. Разработана технология формирования МДО-покрытия на алюминиевых сплавах АМг6.М, Д16.А.Т, 01570, позволяющая получить заданные защитные свойства, выбран электролит (KOH - 2 г/л; $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ - 12,5 г/л) и электрические параметры, обеспечивающие необходимые эксплуатационные свойства покрытия.
5. Разработана методика и конструкция для исследования и оценки в наземных условиях физико-механических характеристик разрушения антиадгезионных покрытий при комплексном воздействии микроударного и фреттингового нагружения.

Практическая значимость результатов подтверждается актом использования результатов исследования в АО «НПО Лавочкина».

Результаты диссертационной работы можно использовать на предприятиях, проектирующих и изготавливающих космические аппараты с

узлами раскрытия, в том числе АО «НПО Лавочкина», а также в учебном процессе технических вузов.

Методология и методы исследования. МДО-покрытие на алюминиевые сплавы наносили по разработанной автором технологии на оборудовании Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Методологической основой исследования послужили работы ведущих российских и зарубежных ученых и государственные стандарты Российской Федерации.

При выполнении работы были использованы современные методы физического материаловедения.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Результаты исследований по выявлению факторов, ответственных за формирование физико-механических свойств покрытий на алюминиевых сплавах в процессе МДО.
2. Совокупность модельных и экспериментальных данных о процессах, происходящих при комбинированном микроударном нагружении и фреттинг-износе алюминиевых сплавов со сформированными на них МДО-покрытиями.
3. Результаты исследований физико-механических процессов, влияющих на стойкость контактирующих оксидных слоев, и результаты экспериментальных исследований характеристик МДО-покрытий на режимах воздействия, приближенных к режимам выведения КА ракетой-носителем.

Личный вклад автора состоит в анализе отечественных и зарубежных литературных источников, постановке целей и задач исследования, выборе электролита для формирования МДО-покрытия, подборе режимов испытаний и условий их проведения, разработке технологического приспособления для исследования материалов на устойчивость к фреттингу при воздействии вибрационных режимов, обработке и анализе результатов, обобщении и формировании научных гипотез и выводов.

Степень достоверности. Данные, полученные в ходе экспериментов, и аналитические выводы по результатам их обработки согласуются с результатами экспериментальных и теоретических работ, описанных в отечественных и зарубежных литературных источниках. Измерения проводились при помощи средств измерения, прошедших метрологическую поверку, с использованием апробированных методик. Достоверность математической модели обеспечивается современными расчетными методиками моделирования с использованием метода конечных элементов, а также верификацией модели по результатам анализа показаний акселерометров в ходе вибрационных испытаний.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы были доложены на XLVIII Научных чтениях памяти К.Э. Циолковского (Калуга, 2013), XLIX Научных чтениях памяти К.Э. Циолковского (Калуга, 2014), XXXVIII Академических чтениях по космонавтике (Москва, 2014), региональной научно-технической конференции «Наукоёмкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе» (Калуга, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022), Научных чтениях памяти К.Э. Циолковского (Калуга, 52-х, 53-х, 54-х, 55-х, 56-х Научных чтениях памяти К.Э. Циолковского (Калуга, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021), XXIV Международной научно-практической конференции, посвящённой памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнёва (Красноярск, 2020), LI международной научно-практической конференции «Научный форум: Технические и физико-математические науки» (Москва, 2022).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 35 печатных работ, в том числе 13 в рецензируемых журналах и изданиях перечня, рекомендованного ВАК РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, общих выводов и приложения. Общий объем составляет 161 страницу, включая 106 рисунков и 15 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 155 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассматриваются факторы негативного воздействия виброударных нагрузок на элементы КА при выведении ракетой-носителем (РН). На основании анализа аварийных случаев КА «Surveyor I», «Gemini 4», «Galileo» сделан вывод о том, что основной причиной адгезии контактирующих поверхностей узлов раскрытия является износ защитных покрытий на этапе выведения космического аппарата РН. Проведен анализ исследований по стойкости к фреттингу и удару защитных покрытий узлов космических аппаратов. Выявлено, что за время выведения КА на орбиту (порядка 10 минут) широко применяемые в космической промышленности покрытия на основе дисульфида молибдена показывают недостаточную стойкость к фреттингу. Обзор исследований покрытий, созданных методом микродугового оксидирования, позволяет рассматривать данный метод в качестве эффективного способа предотвращения адгезии.

Приведено описание и принцип работы типовой конструкции механизма раскрытия КА в качестве объекта применения покрытий. Описаны современные методы испытаний антиадгезионных покрытий узлов КА в наземных условиях. Приведены результаты исследований Европейского космического агентства, согласно которым сила адгезии контактирующих элементов при фреттинг-нагрузке значительно превосходит силу адгезии при ударном воздействии. Результаты данных исследований показали, что после испытания на воздействие фреттинга, практически полностью отсутствует адгезия у алюминиевых образцов с толстым слоем покрытия, что свидетельствует об актуальности задачи изучения МДО-покрытий. Описаны современные технологии МДО. Рассмотрены режимы формирования МДО-покрытий, позволяющие получать покрытия с требуемыми эксплуатационными характеристиками.

На основании анализа рассмотренных теоретических и экспериментальных данных сформулирована цель и поставлены задачи работы.

Во второй главе проанализированы основные подходы к технологии формирования МДО-покрытий. В качестве перспективного рассмотрен способ нанесения локального МДО-покрытия при помощи перемещаемого электрода.

В качестве образцов контактных пар для проведения экспериментальной отработки устойчивости МДО-покрытия к фреттингу и микроудару выбраны: сферические упоры из стали 20Х13, пластины с размерами 35x90x3 мм из алюминиевых сплавов АМг6.М (ОСТ 1 92000-90), 01570 (ТУ 1-809-615-2012), Д16.А.Т (ГОСТ 21631-76). Алюминиевые сплавы находились в состоянии поставки. Исследования зависимости свойств МДО-покрытий от видов применяемых при их формировании электролитов показали, что наиболее подходящим является электролит следующего состава:

КОН – 2 г/л;

$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ – 12,5 г/л.

Приведены электрические параметры, режимы и время формирования МДО-покрытий требуемой толщины (таблица 1), описана схема и устройство установки для формирования МДО-покрытия.

Таблица 1.

Усредненные значения толщины МДО-покрытия и времени оксидирования при изготовлении экспериментальных образцов при электрических параметрах режимов нанесения $I_k/I_a=1,0..1,1$, $J=10,5..11,0$ А/дм².

Материал образца	Время обработки, мин	Толщина покрытия, мкм
АМг6.М	200	50
АМг6.М	490	100
АМг6.М	620	150
01570	300	50
01570	420	80
01570	510	100
01570	660	150
Д16.А.Т	210	35
Д16.А.Т	300	50
Д16.А.Т	510	100
Д16.А.Т	600	120
Д16.А.Т	660	150

Для измерения толщины МДО-покрытия на образцах использован универсальный портативный толщиномер для немагнитных покрытий на магнитном и немагнитном основаниях КОНСТАНТА К5. Для исследования износа МДО-покрытий применен конфокальный лазерный сканирующий микроскоп

Keyence серии VK-X100. Испытания на воздействие вибрации проведены на виброкомплексе V984LS (149) фирмы LING DS LTD с многоканальной системой управления SCADAS III фирмы LMS по одной оси.

Третья глава диссертации содержит результаты моделирования воздействующих факторов на экспериментальные образцы. Описаны методики экспериментального исследования износа рассматриваемых МДО-покрытий. Рассмотрены особенности физико-механических воздействий на контактирующие поверхности элементов раскрытия КА при выведении ракетой-носителем. В качестве критерия оценки антиадгезионных свойств покрытия предложено использовать значение полной энергии адгезии ($W_{адг}^*$), которая затрачивается на разрыв адгезионного контакта площадью S . Приведены расчетные методики моделирования воздействия на контактную пару и определения параметров износа контактной пары.

На основании анализа физико-механических процессов, происходящих в контактных парах при виброударных и других видах внешних воздействий, определено, что процесс взаимного воздействия при нагрузках, аналогичных режиму выведения КА, состоит из трех последовательных стадий:

- фреттинг-износа;
- микроударного воздействия;
- комбинации микроударного воздействия и трения

Используя математическое описание разрушения керамических покрытий при воздействии сферического индентора, известное из литературы, выведена математическая зависимость износа МДО-покрытия от параметров покрытия, условий нагружения и радиуса воздействующего сферического упора.

Описана разработанная автором конструкция приспособления для воспроизведения на вибростенде воздействий, возникающих при выведении КА ракетой-носителем. Оно представляет собой упрощенную модель арретированного механизма раскрытия (рисунок 1) и включает в себя: конструктивный элемент (консольно закрепленную балку), целевую нагрузку (массовый имитатор) и элементы распора (сферический упор и площадку). Для анализа частотных

характеристик приспособления (исключения резонансных колебаний груза) и определения предварительного усилия на упоре была разработана расчетная модель в программе ANSYS.

Описаны условия проведения эксперимента, приведены режимы виброиспытаний по определению критических частот, синусоидальной и случайной вибрации, представлены графики (диаграммы) показаний акселерометров при различных режимах виброн нагружений.

В качестве примера, на рисунке 2 приведены результаты показаний акселерометров при испытании экспериментальных образцов на случайную вибрацию продолжительностью 480 с и интенсивностью 3 дБ, иллюстрирующие возможности созданного метода.

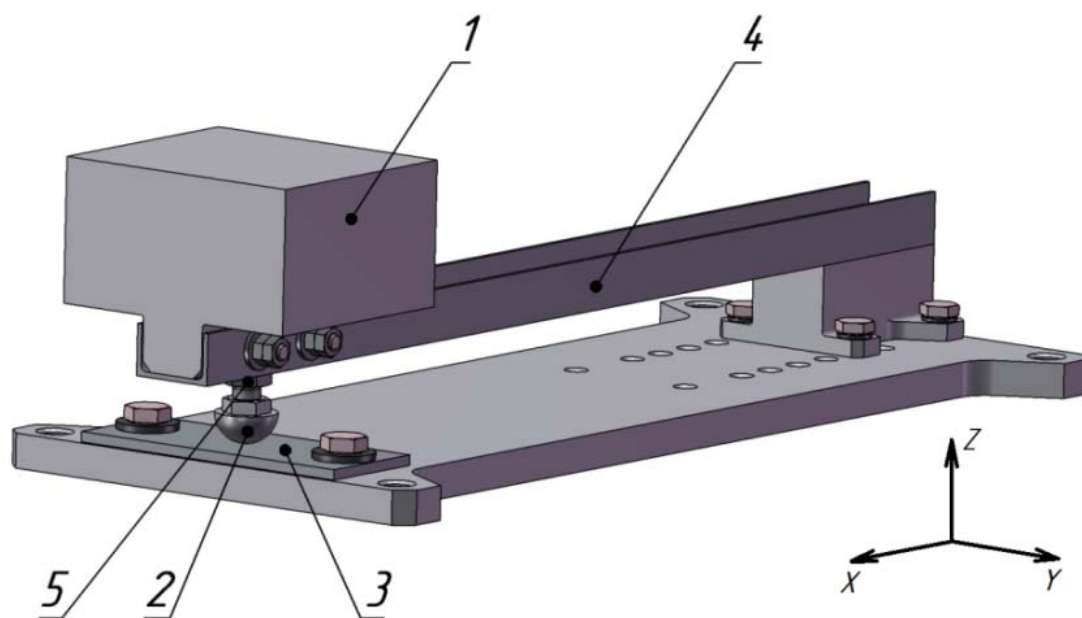


Рисунок 1. Приспособление для моделирования нагрузок на контактирующие поверхности, возникающих при выведении ракетой-носителем.

1 – массовый имитатор; 2 – сферический упор; 3 – площадка; 4 – консольная балка; 5 – гайка. X, Y, Z – оси приложения вибрационных нагрузок

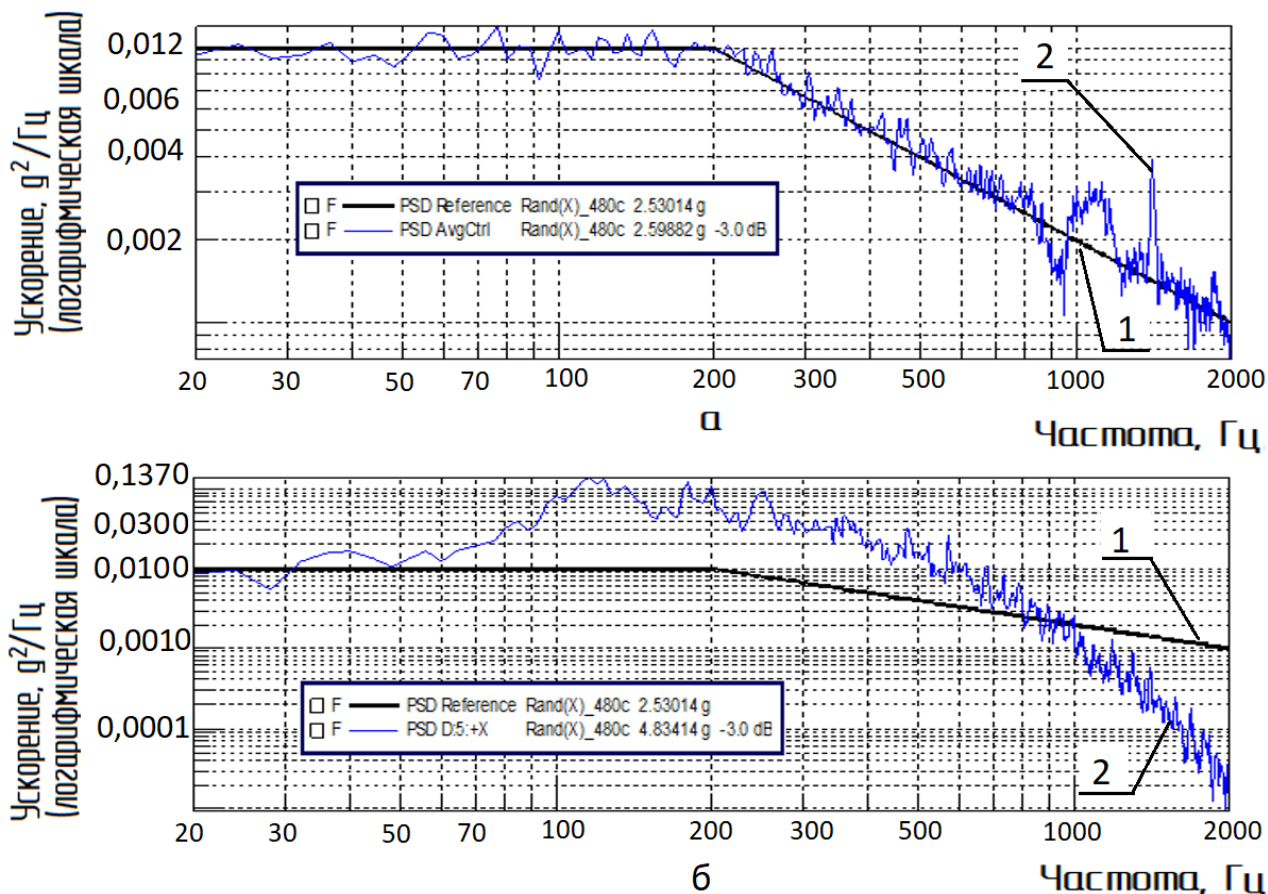


Рисунок 2. Испытания на случайную вибрацию, время 480 с, интенсивность 3 дБ: а - значения задаваемого режима вибронагружения обозначены цифрой 1, показания задающего акселерометра обозначены цифрой 2; б - значения задаваемого режима вибронагружения приведены обозначены цифрой 1, показания акселерометра на массовом имитаторе обозначены цифрой 2.

В четвертой главе диссертации описаны выполненные эксперименты и проведен анализ их результатов, приведены профилограммы зон износа с применением микроскопа Keyence серии VK-X100, получены значения глубины износа (рисунок 3). Дан анализ снимков зон износа при большом разрешении.

Усредненные значения величин твердости образцов сплавов и глубины износа для экспериментальных образцов с МДО-покрытием приведены в таблице 2.

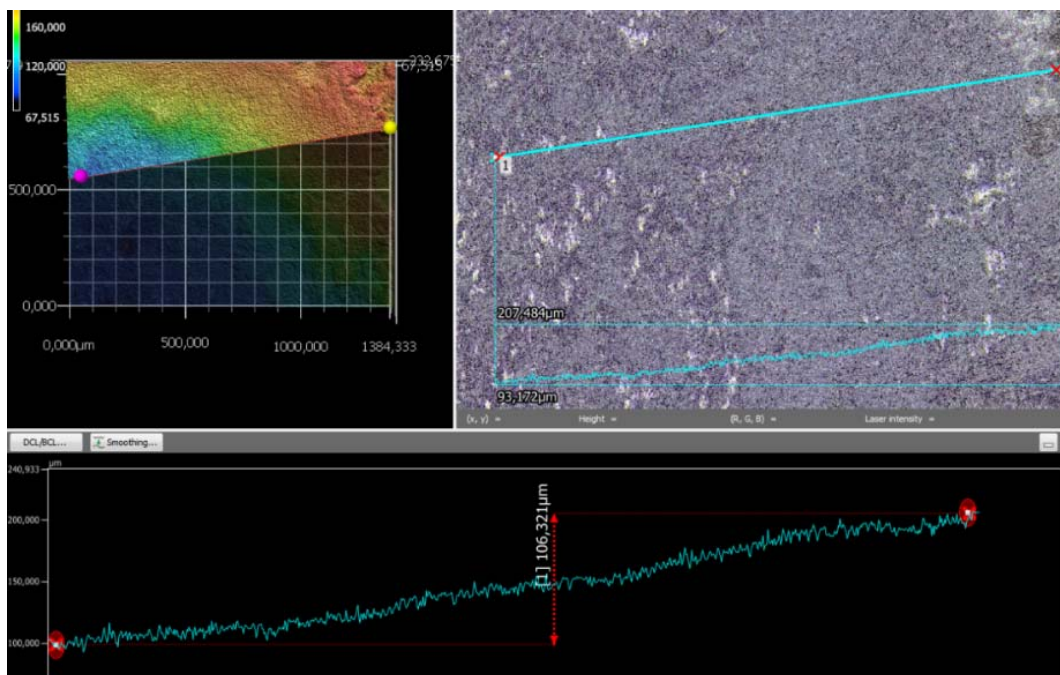


Рисунок 3. Пример профилограммы зоны износа. Сплав Д16.А.Т, толщина покрытия 150 мкм

Таблица 2.

Величина твёрдости и глубина износа экспериментальных образцов с МДО-покрытием

Сплав	Твёрдость, НВ	Глубина износа при применении покрытия толщиной 50 мкм, мкм	Глубина износа при применении покрытия толщиной 100 мкм, мкм	Глубина износа при применении покрытия толщиной 150 мкм, мкм
АМг6.М	65	95,6	168,4	144,5
01570	78	144,2	144,0	139,7
Д16.А.Т	105	151,6	100,7	106,3

Анализ полученных результатов показал, что износостойкий слой МДО-покрытия проявляет упругие (мембранные) свойства. При воздействии нагрузки в виде упора на экспериментальный образец импульс силы передается

через МДО-покрытие без демпфирования к материалу основы. При определенной величине деформации материала основы происходит разрушение и вдавливание МДО-покрытия в материал основы. Чем выше твердость материала основы, тем выше стойкость основы к ударному импульсу, и МДО-покрытие вносит более весомый вклад в сопротивление образца ударным и фреттинг-нагрузкам. Исходя из этих представлений, уточнено известное из литературы уравнение износа для случая ударного воздействия сферического упора на образец с МДО-покрытием, в которое введен безразмерный коэффициент M . Он учитывает влияние твердости материала основы на величину износа сформированного МДО-покрытия в математическом описании разрушения керамических покрытий при воздействии сферического индентора.

$$h = \left(r - \sqrt{r^2 - \frac{3YP_{\Sigma}\sqrt{1 - (1 - \theta_0)\exp(-e_c)}}{2\pi \cdot (1 - \theta_0)\exp(-e_c)}^{\frac{3}{2}}}} \right) \cdot M$$

где

h – глубина износа экспериментального образца;

r – радиус сферы упора;

P_{Σ} – результирующая сумма воздействий на образец, при которой область контакта индентора совпадает с границей ядра на поверхности образца;

Y – контактная прочность покрытия;

θ_0 – исходная пористость образца;

e_c – объемная деформация на границе ядра;

M – эмпирический коэффициент, учитывающий влияние твердости материала основы на разрушение МДО-слоя и определенный из собственных экспериментальных результатов.

Для выявления граничных условий и экстремумов проведены исследования дополнительных образцов из сплава Д16А.Т. В результате получен график зависимости глубины износа от толщины МДО-покрытия (рисунок 4).

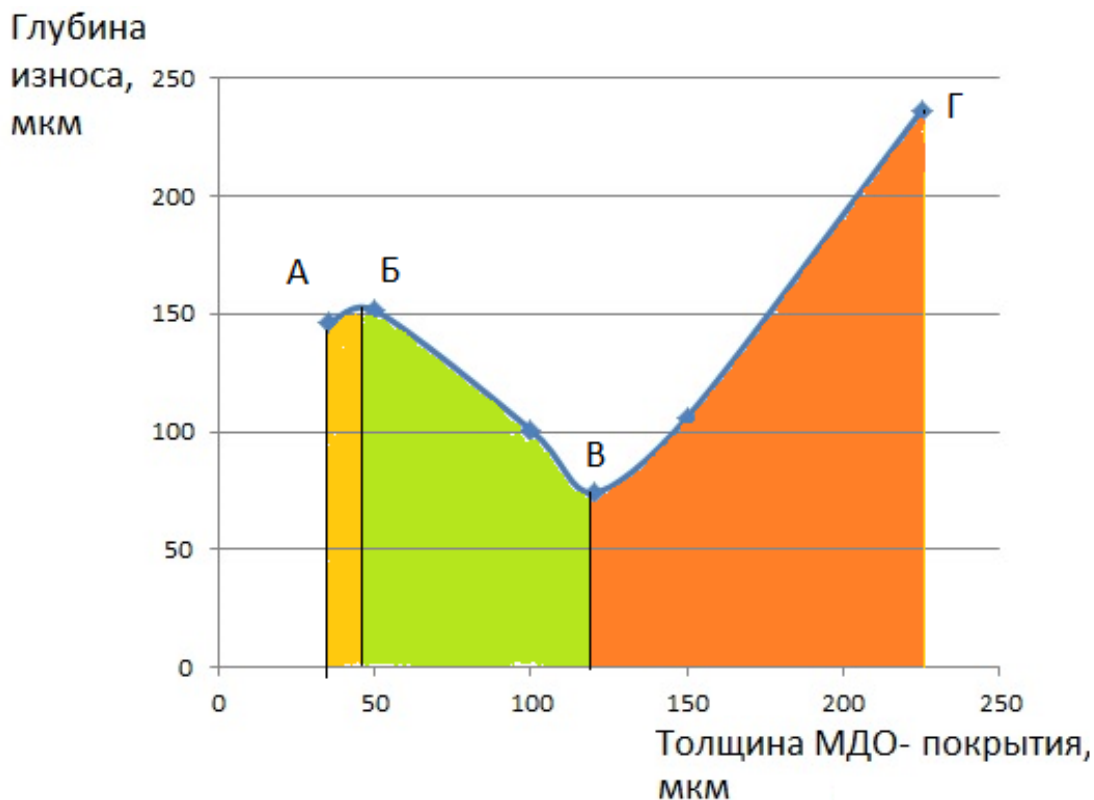


Рисунок 4. График зависимости глубины износа экспериментального образца от толщины МДО-покрытия на основе из сплава Д16.А.Т

На графике выделены 3 области разрушения покрытия и износа экспериментального образца:

1. Зона АБ, где МДО-покрытие не имеет достаточного слоя корунда (α -фазы оксида алюминия) и не вносит вклада в формирование защитных свойств экспериментального образца. Слой, состоящий преимущественно из γ -фазы оксида алюминия, при разрушении начинает работать как абразив, а также увеличивает амплитуду ударного воздействия на экспериментальный образец со стороны сферы упора.
2. Зона БВ, где МДО-покрытие ведет себя как мембрана, и с увеличением толщины происходит увеличение эффективности защитных свойств, о чем свидетельствует снижение глубины износа экспериментального образца.
3. Зона ВГ, где покрытие перестает вести себя как мембрана и передавать полный импульс к материалу подложки. Вследствие этого, с ростом толщины покрытия растет величина износа, т. к. из-за выкрашивания «толстого» покрытия растет амплитуда ударного воздействия со стороны сферы упора.

Для поиска толщины МДО-покрытия, обеспечивающей минимальный износ образца при заданном режиме воздействий, использована аппроксимация данных эксперимента методом наименьших квадратов уравнения квадратичной и кубической регрессии. В результате различными методами получены значения толщины МДО-покрытия на сплаве Д16.А.Т: 116,1 и 119,5 мкм.

Проведено исследование зависимости величины износа экспериментального образца из сплава Д16.А.Т с толщиной МДО-покрытия 120 мкм от площади контакта со сферой индентора. Показано, что при увеличении диаметра сферы индентора с 18 до 30 мм растет площадь трещинообразования между соседними порами в МДО-покрытии, т. е. увеличивается вклад в износ боковых трещин. Это приводит к выкрашиванию покрытия и способствует абразивному воздействию. Увеличение диаметра воздействующей сферы приводит к увеличению площади контакта и, начиная с определенного значения диаметра, к уменьшению износа.

Проведено исследование морфологии пятен контакта на образцах из сплавов АМг6.М, 01570, Д16.А.Т с толщиной МДО-покрытия 50, 100, 150 мкм и ответных упорах. Доказано, что устойчивость и равномерность распределения частиц МДО-покрытия по поверхности воздействующего упора растет с увеличением твердости материала основы. Анализ морфологии пятен контакта на пластинах с МДО-покрытием и на воздействующих сферических упорах доказал антифреттинговые свойства МДО-покрытия, увеличивающиеся с ростом толщины покрытия.

Рассмотрен общий подход к расчету надежности узлов раскрытия КА. Адгезия контактирующих поверхностей при расчете надежности рассматривается как случайное событие. Следовательно, подбору материалов и покрытий контактирующих пар на этапе проектирования нужно уделять серьезное внимание. Даны рекомендации по использованию МДО-покрытий в конструкции кинематических узлов КА.

Основные выводы и рекомендации

1. Проведен комплексный анализ статистики отказов КА и экспериментальных данных по изучению негативных эффектов, происходящих на контактирующих поверхностях узлов раскрытия. Выявлена необходимость применения в их конструкции специальных покрытий, препятствующих взаимной адгезии.
2. Выявлен совместный эффект микроударного и фреттингового воздействий на изнашиваемых контактных поверхностях узлов раскрытия КА. Полученные данные позволяют учитывать величины и комплексные составляющие износа при разработке силовых схем КА и учитывать эффекты от воздействия микроударного и фреттинг-нагружения на этапе выведения РН.
3. Выведена математическая зависимость износа МДО-покрытия от свойств материала основы, параметров покрытия и условий нагружения, получившая экспериментальное подтверждение. Введен безразмерный коэффициент M , учитывающий влияние твердости материала-основы.

$$h = \left(r - \sqrt{r^2 - \frac{3Y P_{\Sigma} \sqrt{1 - (1 - \theta_0) \exp(-e_c)}}{2\pi \cdot (1 - \theta_0) \exp(-e_c)} \cdot M} \right)$$

4. Получена зависимость стойкости образца с МДО-покрытием от твердости алюминиевого сплава-основы. Показано, что с увеличением твердости сплава основы возрастает вклад МДО-покрытия в стойкость элементов КА к микроударному воздействию и фреттинг-износу.
5. Получена экспериментальная зависимость износа образца с МДО-покрытием от толщины покрытия. Кривая износа образца имеет 3 участка, характеризующиеся различными физическими явлениями, наблюдаемыми при разрушении МДО-покрытия: зона роста износа из-за тонкого слоя МДО-покрытия, состоящего преимущественно из γ -фазы оксида алюминия с недостаточным содержанием корунда; зона снижения износа, связанная с увеличением толщины МДО-покрытия и проявлением мембранных свойств при передаче ударного импульса к основному материалу; зона роста износа при дальнейшем увеличении толщины МДО-покрытия, связанная с потерей покрытием мембранных свойств.

6. Создана установка, позволяющая проводить экспериментальные исследования взаимодействия контактирующих пар узлов раскрытия КА при вибрационных и фреттинговых воздействиях.

7. Установлено, что механизм изнашивания и разрушения МДО-покрытий, сформированных на алюминиевых сплавах, при вибрационных и микроударных нагрузках состоит из стадий:

- фреттинг-износа;
- микроударного воздействия;
- комбинации микроударного воздействия и трения.

8. Выявлена зависимость износа образца от площади контакта со сферой индентора. Показано, что основным влияющим на износ фактором является рост трещин в глубину покрытия с последующим выкрашиванием и абразивным воздействием из-за роста площади трещинообразования между соседними порами в МДО-покрытии.

9. Получено научно обоснованное технологическое решение повышения антиадгезионных свойств деталей космических аппаратов из алюминиевых сплавов за счет применения МДО-покрытий.

Получен акт об использовании результатов диссертационной работы в АО «НПО Лавочкина».

Основные научные результаты диссертации отражены в следующих работах:

1. Влияние микродугового оксидирования на коэффициент линейного теплового расширения алюминиевого сплава АМг6 / Е. В. Рыков [и др.] // Главный механик. 2014. № 7. С. 47–52.

2. Применение методов микродугового оксидирования при создании конструктивных элементов космических аппаратов [Электронный ресурс] / Е. В. Рыков [и др.] // Наука и образование (МГТУ им. Баумана) (электронный журнал). 2014. № 6. С.183–192. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/712840.html>.

3. Изучение влияния покрытия, выполненного микродуговым оксидированием, на жёсткость и прочность протяжённых силовых элементов космического аппарата [Электронный ресурс] / Е. В. Рыков [и др.] // Наука и образование (МГТУ им. Баумана) (электронный журнал). 2014. № 7. С. 169-174 (0,38 п. л./ 0,1 п. л.). Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/717592.html>.

4. Микродуговое оксидирование циркония как способ создания элементов теплоразвязки в космических аппаратах [Электронный ресурс] / Е. В. Рыков [и др.]

- // Наука и образование (МГТУ им. Баумана) (электронный журнал). 2014. № 8. С. 174–188. Режим доступа: <http://technomag.bmstu.ru/doc/724519.html>.
5. Многофункциональный метод изготовления прецизионных узлов космического телескопа / Е. В. Рыков [и др.] // Электромагнитные волны и электронные системы. 2016. Т. 21. № 1. С. 27–41.
 6. Пути повышения надёжности работы узлов раскрытия космических аппаратов с отложенным срабатыванием / Е. В. Рыков [и др.] // Вестник «НПО имени С. А. Лавочкина». 2017. № 4 (38). С. 60–67.
 7. Перспективные способы упрочнения поверхностей деталей из титановых сплавов / Е. В. Рыков [и др.] // Научно-технические технологии. 2018. Т. 19. № 6. С. 51–59.
 8. Исследование стойкости твёрдого смазочного покрытия на основе дисульфида молибдена к фреттинг-износу в условиях вибрационного нагружения / Е. В. Рыков [и др.] // Научно-технические технологии. 2019. Т. 20. № 2. С. 40–47.
 9. Актуальные задачи и перспективы конструирования узлов раскрытия космических аппаратов с высоким сроком активного существования / Е. В. Рыков [и др.] // Научно-технические технологии. 2020. Т. 21. № 6. С. 43–48.
 10. Расширение технологических возможностей плазменной электролитической обработки / Е. В. Рыков [и др.] // Научно-технические технологии. 2021. № 22. С. 15–21.
 11. Исследование стойкости микродуговых оксидных покрытий на алюминиевых сплавах к виброударному нагружению и фреттинг-износу при выведении космического аппарата на целевую орбиту / Е. В. Рыков [и др.] // Научно-технические технологии. 2022. Т. 23. № 1. С. 14–20.
 12. Рыков Е. В., Штокал А. О., Артемьев А. В., Шаталов В. К. О модели физических процессов, происходящих при микроударном воздействии сферического индентора на покрытия, сформированные по технологии микродугового оксидирования // Инженерная физика. 2022. № 4. С. 37–44.
 13. Поверхностное микролегирование титановых сплавов при изготовлении силовых упругих элементов космических аппаратов / Е. В. Рыков [и др.] // Титан. 2022. № 1 (74). С. 25–29.