

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

**Акционерное общество
«Научно-производственное объединение имени С. А. Лавочкина»**

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Научный руководитель
доктор технических наук,
профессор
А. М. Мамонов

Москва 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | Стр. |
|--|------|
| СПИСОК ВВОДИМЫХ СОКРАЩЕНИЙ..... | 4 |
| ВВЕДЕНИЕ..... | 5 |
| ГЛАВА 1. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ В УЗЛАХ РАСКРЫТИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПОКРЫТИЙ, УСТОЙЧИВЫХ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ФРЕТТИНГ-ИЗНОСА..... | 12 |
| 1.1. Эффекты, наблюдаемые на контактных поверхностях КА при воздействии виброударных нагрузок на этапе его выведения..... | 12 |
| 1.2. Анализ методов изучения физических свойств покрытий, применяемых для снижения адгезии в механизмах раскрытия КА..... | 20 |
| 1.3. Современное состояние исследований процессов, режимов МДО и их влияние на качество получаемых покрытий..... | 27 |
| 1.4. Постановка задачи..... | 43 |
| Выводы по Главе 1..... | 48 |
| ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОЛУЧЕНИЯ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ МДО..... | 49 |
| 2.1. Основные преимущества выбранного метода оксидирования при получении локальных защитных покрытий..... | 49 |
| 2.2.2. Выбор применяемого электролита..... | 57 |
| 2.3. Разработка методик исследования экспериментальных образцов..... | 64 |
| 2.3.1. Методика определения толщины МДО-покрытий..... | 64 |
| 2.3.2. Методика определения параметров износа поверхности с МДО-покрытием..... | 65 |
| Выводы по Главе 2..... | 66 |
| ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА АНТИФРЕТТИНГОВЫЕ СВОЙСТВА МДО-ПОКРЫТИЙ..... | 67 |
| 3.1. О модели физических процессов, происходящих в контактных парах при виброударных и других видах внешних воздействий..... | 67 |

| | |
|---|------------|
| 3.2. Некоторые особенности проявления воздействующих факторов на контактирующие поверхности элементов раскрытия КА..... | 76 |
| 3.2. Методика моделирования воздействий на контактную пару | 78 |
| 3.4. Разработка и исследование режимов воздействий на контактную пару..... | 87 |
| Выводы по Главе 3 | 105 |
| ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТОЙКОСТИ К ВОЗДЕЙСТВИЮ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА СВОЙСТВА И СТРУКТУРУ МДО-ПОКРЫТИЯ В ЗОНЕ КОНТАКТА ЭЛЕМЕНТОВ РАСКРЫТИЯ КА | 107 |
| 4.1 Влияние физических характеристик материала основы МДО-покрытий на величину износа образца | 107 |
| 4.2 Влияние толщины МДО-покрытия на величину износа образца | 118 |
| 4.3 Влияние диаметра воздействующего упора на величину износа образца с МДО-покрытием | 123 |
| 4.4 Исследование морфологии контактной поверхности | 128 |
| 4.5 Практические рекомендации по использованию МДО-покрытий в узлах раскрытия космических аппаратов..... | 133 |
| Выводы по Главе 4 | 138 |
| ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ | 141 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... | 141 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ..... | 161 |

СПИСОК ВВОДИМЫХ СОКРАЩЕНИЙ

МДО – микродуговое оксидирование;

МДО-покрытие – покрытие, выполненное микродуговым оксидированием;

КА – космический аппарат;

АО – акционерное общество;

РН – ракета-носитель;

ВВС – военно-воздушные силы;

НАСА – национальное агентство по аэронавтике и исследованию космического пространства (США);

ЕКА – Европейское космическое агентство;

ТПУ – Томский политехнический университет;

ТСП – твердосмазочные покрытия;

РФ – Российская федерация;

ДВО РАН – Дальневосточное отделение Российской академии наук;

НИТУ – Национальный исследовательский технологический университет;

МИСиС – Московский институт стали и сплавов;

ВАХ – вольтамперные характеристики;

БС – батареи солнечные.

ВВЕДЕНИЕ

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 основе 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 уровнем 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.

Степень разработанности темы исследования. В последние годы для защиты металлов и сплавов от различных видов воздействий, таких как износ, коррозия при использовании в различных отраслях промышленности, в том числе в морской технике, нефтедобывающей промышленности и других, используют МДО-покрытия. Известны исследования, выполненные Глезером А. М., Громовым В. Е., Ивановым Ю. Ф., Коноваловым С. В., Кормышевым В. Е. по получению, определению структуры и изучению свойств износостойких покрытий на различных сталях. Широко ведутся исследования и разработки на применение лазерной, плазменной, газодинамической и электродуговой наплавки композитных покрытий. Зарубежные исследователи (Merstallinger A., Sales M., Semerad E. и др.) создают антифреттинговые покрытия для эксплуатации их в вакууме. Отечественные исследователи из МГТУ им. Н. Э. Баумана, МАИ, НИТУ «МИСиС», «Сибирского индустриального университета» (Шаталов В. К., Пономарёв И. С., Штокал А. О., Кривоносова Е. А. и др.) исследуют процессы МДО для различных условий эксплуатации, в том числе на алюминиевых и титановых сплавах, широко применяемых в космической промышленности.

Таким образом, для решения специфических задач в космической технике возможно применение покрытий на лёгких сплавах, которые создаются на их поверхностях МДО-методом. Высока вероятность того, что этот метод позволит получить покрытия с параметрами микроструктура-твёрдость-износ, обеспечивающими эксплуатационные свойства, необходимые для элементов КА.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является научно-методическое обоснование и определение установление 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 заключается в следующем:

1. Впервые, на основании анализа процессов, происходящих при виброн нагружении 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 $I_k/I_a=1,0...1,1$, $J=10,5...11,0$ 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 и апробация работы. 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, 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).

По результатам, полученным в ходе диссертационной работы, автором написано и опубликовано 35 статей. Из их числа – 13 опубликовано в рецензируемых изданиях и журналах перечня, рекомендованного ВАК РФ.

Структура и объем диссертации. Структура диссертации включает в себя: введение, четыре главы, заключение, общие выводы, приложение на 1 странице, содержит 106 рисунков и 15 таблиц, список литературы состоит из 155 наименований. Общий объем диссертации составляет 161 страницы.

ГЛАВА 1. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ В УЗЛАХ РАСКРЫТИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПОКРЫТИЙ, УСТОЙЧИВЫХ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ФРЕТТИНГ-ИЗНОСА

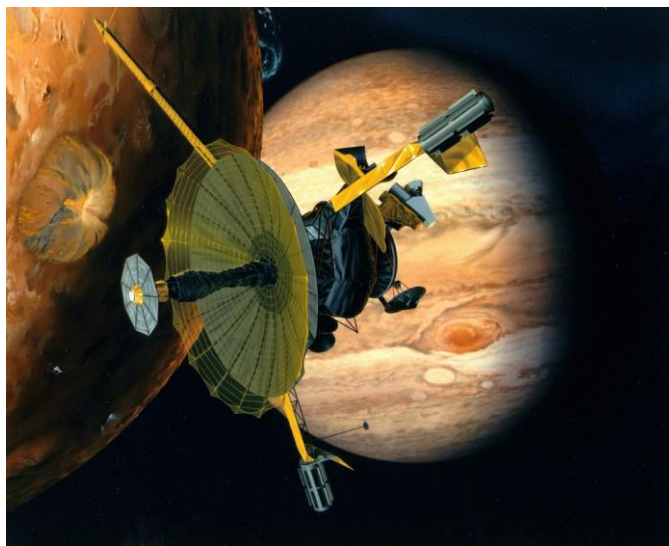
1.1. Эффекты, наблюдаемые на контактных поверхностях КА при воздействии виброударных нагрузок на этапе его выведения

Современные КА, совершающие длительные межпланетные миссии, должны обеспечивать безотказную работу в условиях различных внешних воздействий.

Для расположения габаритных узлов КА под обтекателем РН применяют кинематические раскрывающиеся устройства исполнения. Предварительно сложенный до необходимых габаритов и заневоленный исполнительный узел КА раскрывается в рабочее положение после сброса обтекателя РН. Примером таких узлов могут служить солнечные батареи, антенны, грунтозаборные и посадочные устройства КА (Рисунки 1.1, 1.2).



а)



б)

Рисунок 1.1.

Антенна автоматического космического аппарата:

а) в сложенном виде, б) в раскрытом виде

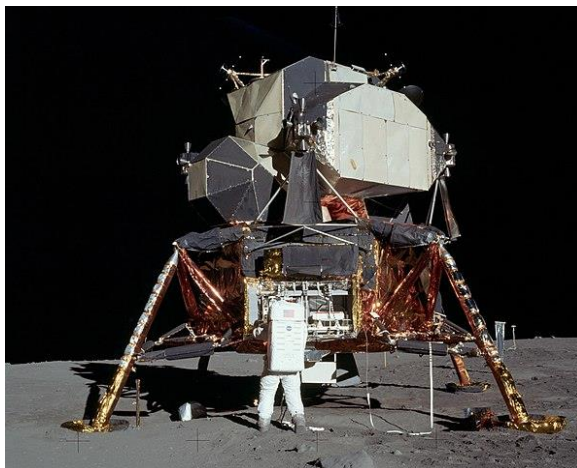


Рисунок 1.2.

Космический аппарат для исследования Луны

Одним из факторов негативного воздействия на элементы КА, находящихся в заневоленном состоянии, является адгезия в условиях глубокого вакуума, которая может привести к эффекту «холодной» сварки. На этапе выведения КА в его элементах наблюдаются микроудары, фреттинг-износ контактирующих поверхностей. Происходит, также, стирание защитных покрытий, предназначенных для предотвращения адгезии.

Самопроизвольная адгезия у металлов возникает в результате их контакта, в том случае если поверхности являются гладкими, идеально чистыми, а кристаллические решетки противоположных поверхностей имеют одинаковую ориентацию [1].

Все металлические поверхности подвергаются воздействию окружающей среды и в земных условиях не являются чистыми. Таким образом, можно выделить на них, по крайней мере, три различных слоя:

- слой адсорбированных газов;
- слой оксида;
- сам объемный металл.

Загрязняющие пленки, как правило, состоят из слоев адсорбированных газов и оксидов и на металлах, образуются очень быстро даже при пониженном давлении. Основной причиной разрушения выше описанных пленок на этапе

выведения КА, является то, что вибрационные нагрузки способствуют интенсификации роста упругопластических деформаций, превышающих деформации, возникающие при трении без участия вибрации, а также ускоряют усталостное разрушение поверхностных слоев взаимодействующих материалов [2]. Поэтому задача правильного подбора покрытий, препятствующих адгезии, особенно актуальна для узлов раскрытия, срабатывание которых происходит через длительное время после выведения космического аппарата. За время эксплуатации КА был выявлен ряд случаев, когда «холодная сварка» контактирующих узлов в условиях космического вакуума способствовала выходу из строя целых систем КА и ставила под угрозу выполнение всей миссии. Необходимо отметить, что причина отказа механизмов КА именно вследствие взаимной адгезии поверхностей после выведения сложно диагностируема. Кроме того, механизмы с длительным отложенным срабатыванием не имеют широкого распространения и унификации, так как применяются преимущественно в автоматических межпланетных станциях, процент которых по сравнению с остальными КА относительно невелик. Тем не менее, стоимость автоматических межпланетных станций значительно превышает стоимость околоземных КА, поэтому стабильная работоспособность механизмов межпланетных станций для них особенно важна. Важно выявлять и анализировать все известные факты негативного проявления адгезии.

Одним из примеров такого влияния адгезии в условиях космического вакуума является эксплуатация автоматической межпланетной станции «Surveyor I» на поверхности Луны. Потенциометр системы определения положения азимутальной оси утратил работоспособность после 100 часов работы. В качестве причины была названа проблема со смазочными материалами. В 1961 году в рамках эксперимента «West Ford» была попытка выведения на орбиту силами ВВС США пятидесяти фунтов игл из тонкой медной проволоки. Эксперимент завершился неудачей, в качестве одной из версий была выдвинута гипотеза о том, что произошло взаимное сваривание игл из-за адгезии в вакууме. Во время эксплуатации пилотируемого космического аппарата «Gemini 4»

произошло заклинивание люка для выхода астронавтов в открытый космос. Причиной заклинивания могла стать «холодная сварка» петель люка. В петлях один подвижный элемент был изготовлен из титана, а другой из алюминиевого сплава. На трущиеся поверхности была нанесена сухая смазка, чтобы предотвратить адгезию. Выяснилось, что перед запуском был непреднамеренно удален слой смазочного материала, как следствие этого имела место адгезия шарнирных элементов в петлях люка.

Наиболее показательным примером отказа, вызванного взаимной адгезией поверхностей элементов после фреттинга, является неисправность на автоматическом космическом зонде «Galileo» произошедшая в 1991 году. Траектория полета аппарата лежала вблизи Солнца, и аппарат был повернут в положение, позволяющее ему находиться в тени солнцезащиты. В данной конфигурации основная антенна (состоящая из раскрывающихся сегментов) находилась в сложенном состоянии. Когда аппарат вышел на безопасное расстояние от Солнца, была дана команда на раскрытие основной антенны. Однако полного раскрытия антенны не произошло. После полутора лет нахождения в космическом пространстве элементы основной антенны (сегменты), заневоленные в транспортном положении, не смогли раскрыться. Анализ отказа выявил, что к «холодной сварке» элементов раскрытия антенны привел фреттинг-износ, происходивший при транспортировке КА на космодром, а также при выведении ракетой-носителем на расчетную орбиту [3].

Известны способы предотвращения фреттинг-процесса путем использования различных смазок. Применение твердосмазочных покрытий на основе дисульфида молибдена широко распространено как в отечественной космонавтике, так и в космических программах Европейского космического агентства (ЕКА) и Национального аэрокосмического агентства США (НАСА). Коэффициент трения у таких покрытий значительно ниже, чем у ряда других твердых смазок, и склонен снижаться с увеличением нагрузок [4]. Однако, в ходе экспериментальных исследований выявлено, что при фреттинге и микроударе подобные покрытия теряют эффект смазки и имеются случаи возникновения

адгезии. Исследования, проведенные специалистами ЕКА, указывают на плохую сохраняемость твердосмазочных покрытий при наличии фреттинг-износа, кроме того, повреждённое покрытие показывает низкую эффективность для предотвращения взаимной адгезии контактирующих поверхностей, особенно при продолжительном контакте [5]. Ряд покрытий на основе дисульфида молибдена подвержен негативному влиянию влажности окружающей среды [6].

Выполненные аналитические исследования дают основания утверждать, что перспективным способом предотвращения адгезии контактирующих деталей из алюминиевых сплавов является нанесение защитных покрытий, полученных, например, методом микродугового оксидирования (МДО), по крайней мере при формировании защитного керамического слоя на поверхностях алюминиевых, а также магниевых и титановых деталей [7, 8, 9].

Исследования триботехнических свойств МДО-слоев на деформируемых алюминиевых сплавах, подтверждают эффективность их применения при различных условиях эксплуатации [10-12]. Преимуществом таких покрытий является их высокая твердость, низкое газовыделение, хорошая износостойкость при высоких нагрузках [13-29], однако механизм изнашивания и разрушения данных покрытий вибрационным воздействием недостаточно полно изучен.

Полученные результаты [21, 22, 28, 29], а также сведения, изложенные в работах других отечественных исследователей [20, 23], позволяют утверждать, что адгезия контактирующих поверхностей с МДО-покрытием при эксплуатации различных деталей КА минимальна по причине того, что сварка керамических материалов диффузионным методом возможна только с использованием металлических промежуточных слоёв при температуре, превышающей 1600 °С.

Из результатов работ [26-29] следует, что правильный выбор сплава, на который наносится МДО и подбор его толщины даёт возможность наиболее рационально применять материалы в конструкции КА и в целом ряде случаев отказаться от применения более дорогостоящих и тяжелых сплавов в пользу более легких алюминиевых сплавов.

МДО-технология хорошо освоена в РФ и регламентируема ГОСТ Р 9.318-2013. Исследованиями особенностей данной технологии занимаются такие университеты, как МГТУ, МАИ, ТПУ и другие.

Ниже приведено описание объекта применения покрытий. Стандартная конструкция механизмов раскрытия КА предусматривает фиксацию через контакт сферического упора с опорным кронштейном (Рисунок 1.3). В ряде конструкций существуют толкатели, придающие кинетическую энергию элементу раскрытия для страгивания с «мертвой точки». Контакт толкателя с элементом раскрытия также происходит по схеме упор-площадка. Во время наземной отработки КА происходит периодическое раскрытие механизмов, причем при наземной экспериментальной отработке адгезия между металлическими интерфейсами узлов раскрытия не наблюдается как после ударных нагрузок, так и после фреттинга.

Согласно циклограмме полетного задания упор, предварительно закрученный с определённым моментом, давит на площадку, распирая узел раскрытия в период доставки КА до целевой точки траектории полета, в которой происходит его раскрытие. Подобная схема механизма позволяет позиционировать конструкцию в процессе транспортировки и выведения, когда на КА воздействуют интенсивные вибрационные нагрузки, и уменьшить таким образом взаимные перемещения контактирующих элементов относительно друг друга [2]. Необходимо учитывать также то, что упор, затянутый с необходимым для обеспечения условий жесткости конструкции моментом, как нами было показано [29], воздействует на ответную площадку и может нанести повреждение непрочному тонкому покрытию, создавая условия для возникновения «холодной сварки» в вакууме.

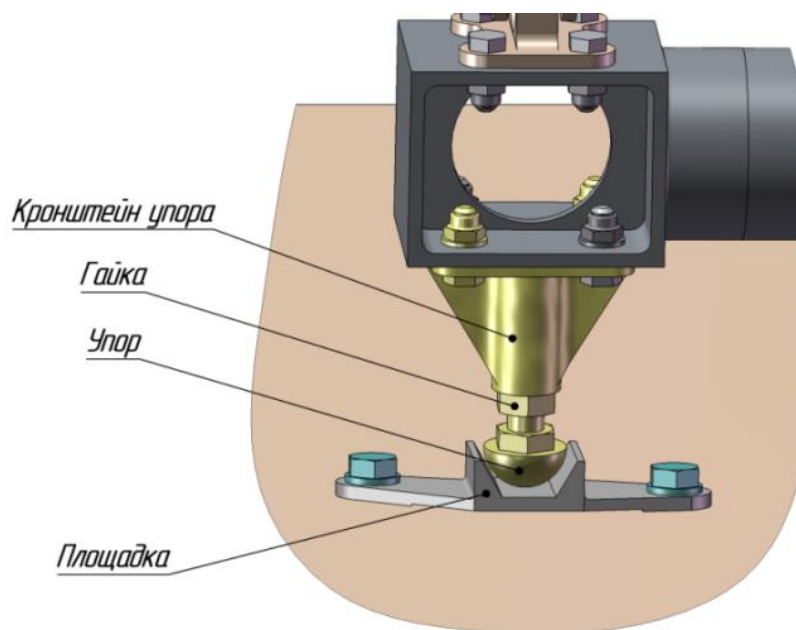


Рисунок 1.3.

Контактная пара типовой конструкции механизмов раскрытия КА

Отсутствие адгезии между металлическими интерфейсами узлов раскрытия на этапе наземной экспериментальной отработки после вибронагружения во многом обуславливается восстановлением оксидных пленок по площади пятна контакта истирания материалов. Восстановление оксидных плёнок происходит из-за воздействия с окружающей атмосферой. При выведении КА на расчетную орбиту, оксидные слои механически разрушаются и необратимо удаляются при фрикционном или непосредственном взаимодействии твердых тел. В условиях вакуума восстановления оксидной пленки по площади пятна контакта истирания материалов не происходит, и таким образом возрастает адгезия у контактирующих материалов, и возможно появление сварочных эффектов.

Оксидирование и фосфатирование металлов позволяет создать на поверхности деталей плотные и устойчивые в вакууме плёнки, препятствующие образованию ювенильных поверхностей металлов, что затрудняет процесс взаимной адгезии, в связи с чем они рассматриваются в данной работе.

М. Д. Нусимов [30] отмечал, что склонность к «холодной сварке» наиболее выражена у тех металлов, которые способны, по крайней мере, частично к образованию твердых растворов и сплавов. К ним относятся, например, металлы с кубической кристаллической решеткой. У взаимно нерастворимых металлов адгезионные взаимодействия проявляется значительно слабее (Таблица 1) [31].

Видно, что низкая адгезия наблюдается у контактирующих материалов имеющих высокую твёрдость, а также низкую пластичность и высокий модуль упругости [1]. Специалистами НАСА проведен цикл экспериментов по изучению воздействия факторов космического пространства, в том числе глубокого вакуума, на различные материалы. Суть их заключалась в том, что вакуумную камеру помещались исследуемые металлы и создавалось разряжение, соответствующее давлению на высоте 800 км над Землей. Эксперименты показали, что металлы, достаточно плотно прижатые друг к другу в течение нескольких дней в разряженной безвоздушной среде, прочно свариваются.

Таблица 1.

Адгезионная способность некоторых контактных пар в сверхвысоком вакууме.

| Высокая | Низкая | Примечание |
|---------|--|------------------|
| Fe-Al | Cu-Mo | $P = 10^{-9}$ Па |
| Cu-Ag | Ag-Mo | $P = 10^{-9}$ Па |
| Ni-Mo | Ag-Ni | $P = 10^{-9}$ Па |
| Ni-Ni | Ge-Ge | $P = 10^{-9}$ Па |
| | Ta-Cu | $P = 10^{-9}$ Па |
| | W-Cu | $P = 10^{-9}$ Па |
| | Al ₂ O ₃ -Al ₂ O ₃ | $P = 10^{-5}$ Па |

1.2. Анализ методов изучения физических свойств покрытий, применяемых для снижения адгезии в механизмах раскрытия КА

«Холодная сварка» в качестве одной из причин отказа механизмов КА была рассмотрена учёными из ЕКА в конце 80-х и начале 90-х годов прошлого века [32]. При этом высказана необходимость проведения лабораторных испытаний с целью оценить влияние статического контакта в среде вакуума для различных поверхностей. Для этого были созданы два варианта специализированного лабораторного оборудования, действующих по принципу: «воздействие на объект» и «воздействие на объект с фреттинг-нагрузением» (Рисунок 1.4). Тесты были основаны на повторяющемся контакте оси (упора) и диска. При испытании на ударное воздействие в каждом цикле происходит контакт при ударе оси о диск с определенной энергией, а в случае испытания на воздействие с фреттингом, ось подводится к диску до контакта (без удара), и к этой контактирующей сборке применяется фреттинг-нагружение. Для обоих тестов за силу адгезии принималось усилие, которое требуется, чтобы разорвать контакт [32, 33]. Схематично принцип работы такого устройства изображен на Рисунке 1.5.

Для композиционных покрытий при описании режимов воздействия фреттинга обычно определяют различие между кинематикой фреттинга и возвратно-поступательным движением. Началом перехода от фреттинга к возвратно-поступательному изнашиванию является увеличение расстояния движения образца более чем на два радиуса пятна контакта (Рисунок 1.6) [34]. Радиус пятна контакта, в свою очередь, определяют по теории Герца, а зависит он от механических свойств взаимодействующих металлов [35].

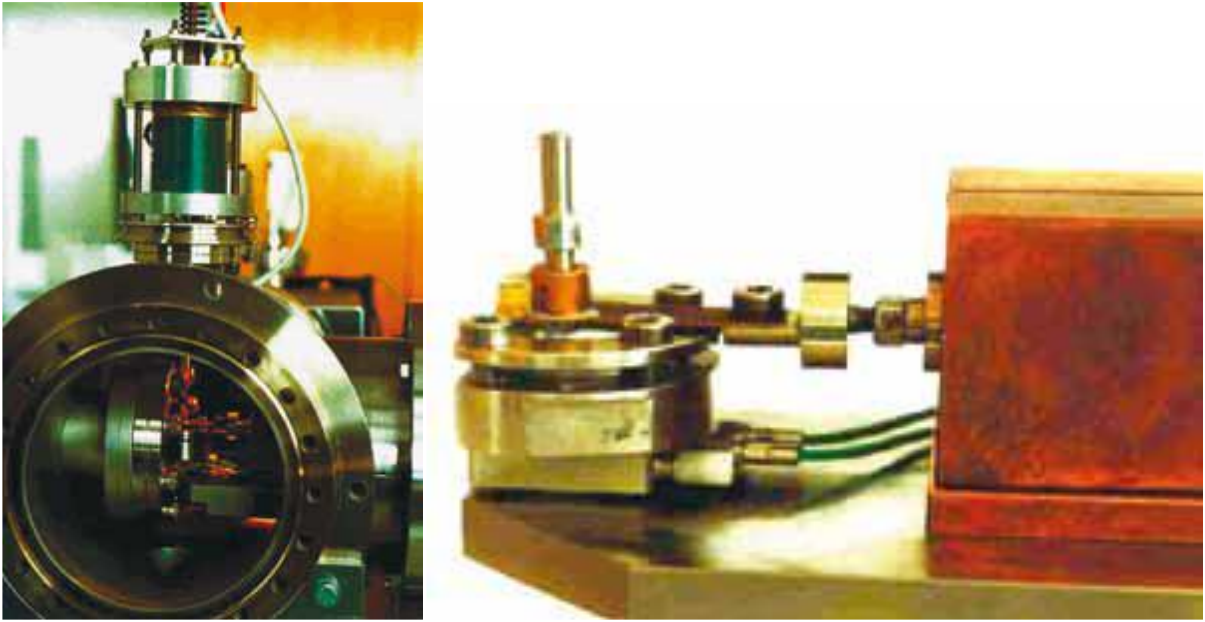


Рисунок 1.4.

Лабораторная установка для измерения силы адгезии при ударном и фреттинг-нагрузении

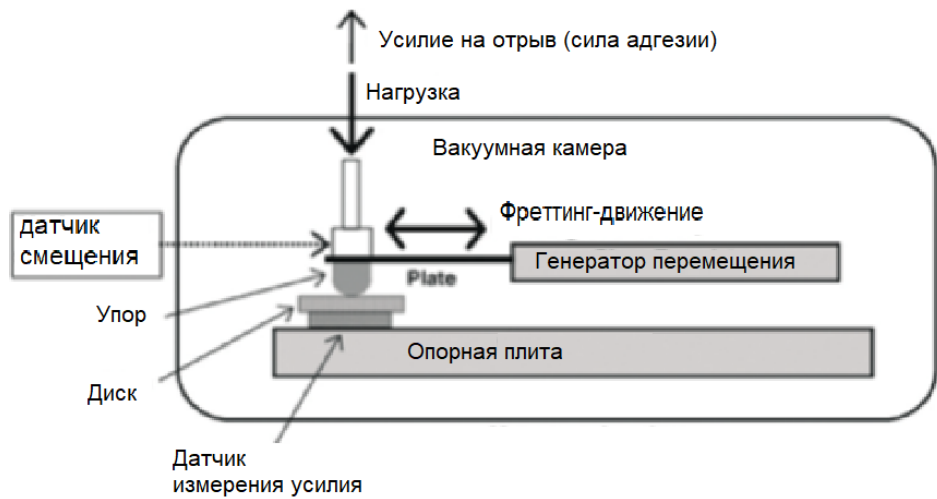


Рисунок 1.5.

Принципиальная схема лабораторной установки для измерения силы адгезии при ударном и фреттинг-нагрузении

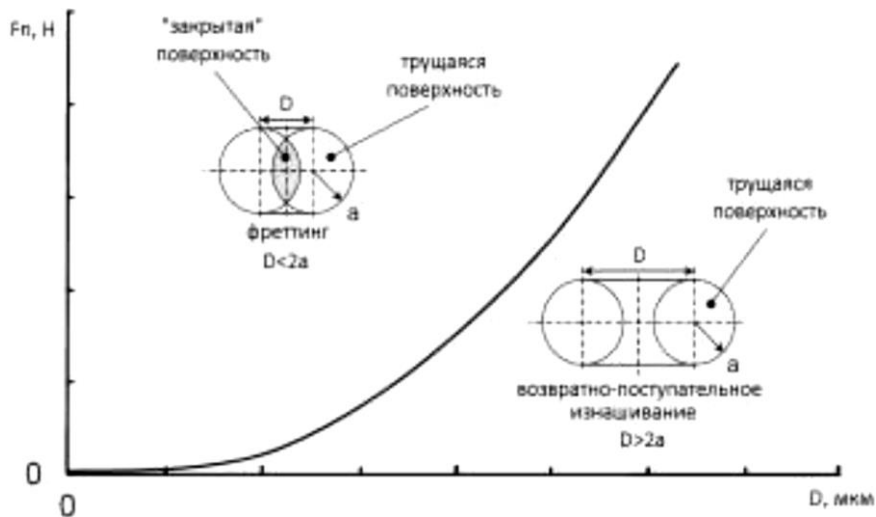


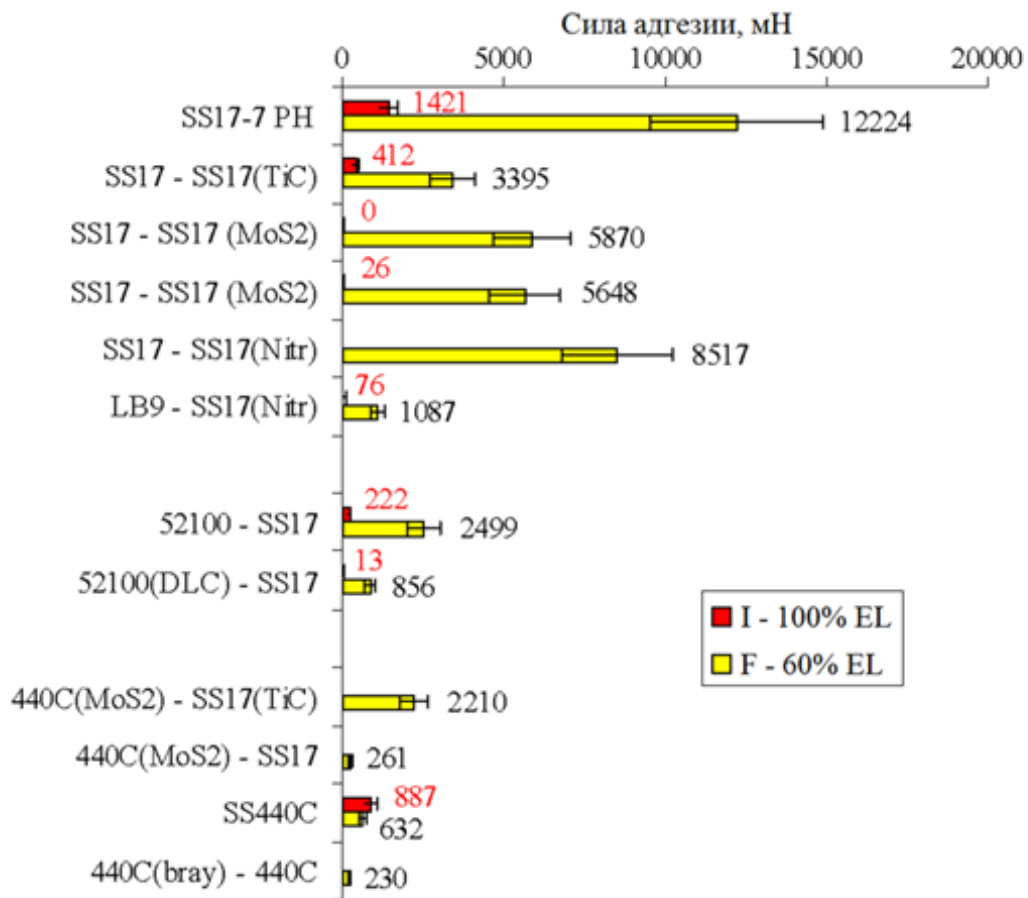
Рисунок 1.6.

Граница и условия перехода между режимом фреттинга и возвратно-поступательным изнашиванием

В этом направлении специалистами ЕКА в 2009 году были проведены исследования силы адгезии, возникающей между металлами с разными защитными покрытиями при фреттинг-нагрузении [5]. В данных экспериментах было воспроизведено явление процесса фреттинг-нагружения, которому подвергаются отдельные узлы и механизмы, применяемые в КА на этапах его наземной эксплуатации, а также при выведении его РН на целевую орбиту. В результате проведённых исследований было выявлено, что твёрдосмазочные покрытия недостаточно хорошо сохраняются на поверхности металлов при фреттинг-нагружении, а при повреждении покрытия сильно снижается эффективность в части предотвращения взаимной адгезии соприкасающихся поверхностей исследуемых металлов при продолжительном контакте.

Из приведённых на Рисунке 1.7 графиков следует, что в какой-то мере все рассмотренные авторами покрытия снижают адгезию при ударе и фреттинге. Эффективность применения покрытия, например, на основе MoS_2 при фреттинг-износе ограничена его невысокой износостойкостью при данном режиме нагружения, поэтому смазка на основе MoS_2 теряла свою эффективность после 20 циклов (200 секунд фреттинга, 42 000 воздействий).

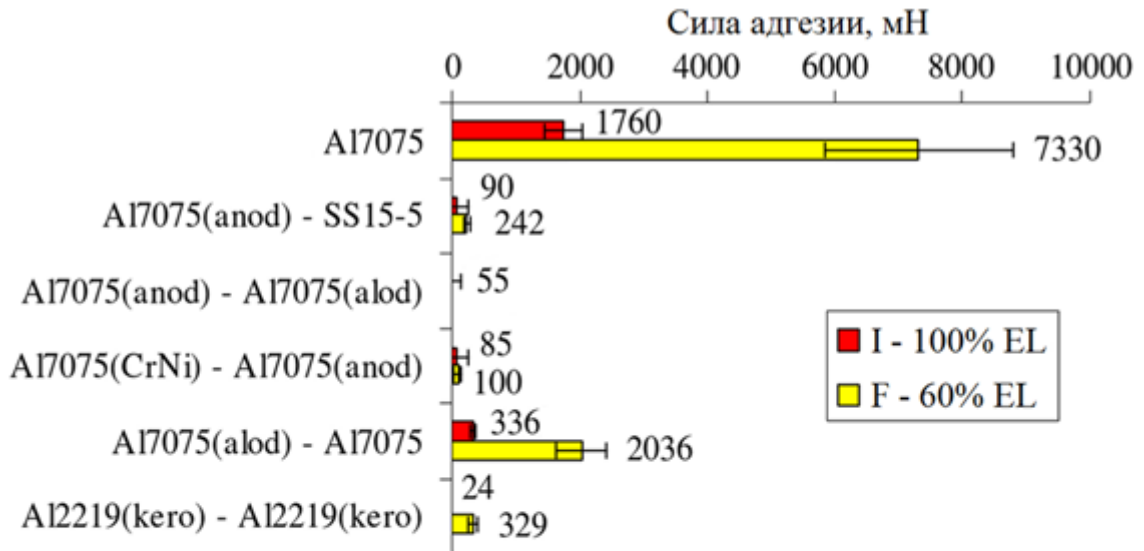
В этой же работе [5] приведены данные о применении специалистами ЕКА покрытий на основе керамики с целью предотвращения взаимной адгезии поверхностей металлов, находящихся в контакте (Рисунок 1.8). Ранее сообщалось, что на поверхностях металлов вентильной группы (сплавы алюминия, магния, титана, циркония) можно создать керамический слой с использованием технологии микродугового оксидирования (европейское наименование – Керонит) [36].



SS17-7PH, SS17 – нержавеющая сталь SS17-7PH (стандарт AISI, США); TiC – износостойкое покрытие на основе карбида титана; MoS2 – твердое смазочное покрытие на основе дисульфида молибдена MoS₂; Nitr – азотирование; LB9 – бронза LB9, содержащая свинец; 52100 – шарикоподшипниковая сталь AISI 52100 (США); DLC – алмазоподобное покрытие; 440C, SS440C – коррозионно-стойкая хромистая подшипниковая сталь AISI 440C (США); bray – низкотемпературная антикоррозийная консистентная смазка Braycote 601; EL – предел упругости контактирующих материалов.

Рисунок 1.7. Сила адгезии покрытий на стали в условиях удара (I) и фреттинга (F)

Основываясь на результатах исследований ЕКА, можно сделать вывод, что достаточно толстый оксидный слой на алюминиевых сплавах позволяет обеспечивать эффективную защиту от адгезии при фреттинговых нагрузениях (Рисунок 1.8).



Al7075 – высокопрочный алюминиевый деформируемый сплав AA7075 (стандарт ANSI, США); anod – твёрдое анодирование; SS15-5 – ферритная нержавеющая сталь SS15-5PH (стандарт AISI, США); alod – двухкомпонентный химический состав для формирования защитного покрытия на алюминиевых поверхностях Alodine 1200; CrNi – хромоникелевая плакировка; Al2219 – алюминиевый деформируемый сплав AA2219 (стандарт ANSI, США); kero – Керонит, МДО-покрытие.

Рисунок 1.8. Сила адгезии покрытий на алюминии в условиях удара (I) и фреттинга (F)

Из графиков, приведённых на Рисунке 1.8 видно, что адгезия между деталями из алюминиевых сплавов эффективно снижается в случаях применения таких покрытий в виде твёрдого анодирования (anod), хромоникелевой плакировки (CrNi). Кроме того, адгезия практически отсутствует для образцов с толстым слоем покрытия Керонит (kero, МДО-покрытие). Эти данные подтверждают актуальность задачи исследования МДО-процесса в качестве механизма предотвращения адгезии.

МДО является видом поверхностной электрохимической обработки и упрочнения металлов, относящихся к вентильной группе, работы над которым начались с традиционного анодирования. Под действием высокого напряжения на поверхности детали возникают точечные микроразряды, под воздействием которых формируются керамические покрытия, имеющие различные эксплуатационные и функциональные свойства, например, износостойкость, коррозионностойкость, теплостойкость, электроизоляционные и другие свойства [37].

Впервые с эффектами, подобными МДО, в конце XIX века столкнулся Слугинов Н.П. [38], который, исследуя явления гальваноллюминесценции, выявил некоторую схожесть между вольтовой дугой и свечением в электролитах. Он заметил, что при свечении электрода жидкость не касается его поверхности. Электрический ток проходил через пар в виде искр. В ходе дальнейших исследований свечения в электролитах ученые обнаружили возможность анодирования образцов из алюминиевых сплавов при помощи искровых разрядов. Позднее, А. Гюнтершульце и Г. Бетцем был описан эффект искрения при анодировании в области повышенных напряжений, где описывалось искрение, которое сопровождалось обильным газовыделением в процессе термического разложения воды в разряде [39, 40].

В середине прошлого века под руководством американских исследователей Л. Грасса и У. Макнейла были проведены эксперименты по практическому использованию протекающих в анодной искре реакций для синтеза сложных оксидных покрытий из компонентов подложки и электролита. Было установлено, что при анодировании в искровом режиме образование сложных оксидов происходит по причине высокотемпературного разложения компонентов электролита в разряде, а также последующих реакций металла субстрата с анодными оксидами [41].

В СССР с 70-х годов наблюдался рост количества исследований, связанных с процессами микродугового оксидирования. Это время ознаменовалось значительным количеством публикаций и патентов учёных различных школ.

Прежде всего, это группа Маркова Г.А. по микроплазменной обработке [42-51], которая ввела определение «микродуговое оксидирование» применительно к данному процессу и предложила классифицировать процессы МДО в зависимости от режимов и используемых при проведении МДО электролитов.

Следует упомянуть так же работы ученых, выполнявших исследования анодно-искрового электролиза, в том числе Снежко Л.А. и Черненко В.И. [52-57]; Фёдорова В.А. [58-60], Саакян Л.С. и Ефремова А.П. [61-67], работавших по тематике микродугового оксидирования в московской академии нефти и газа. Хорошо известны работы Суминова И. В. по исследованию и оптимизации технологических параметров процесса МДО, направленные на создание покрытий различного функционального назначения [68,69], а также исследовательской школы Гордиенко П.С. в ДВО РАН [70-74]. Важными являются исследования анодно-искрового оксидирования легких сплавов, выполненные под руководством Ракоча А.Г. в НИТУ «МИСиС» [75, 76] и других отечественных исследователей.

Не менее значим вклад американских исследователей: эксперименты по осаждению элементов в анодной искре Брауна и Тран Бао Вана [77, 78], американские патенты Крейга и Роджерса [79-81]. Так же следует отметить работы ученых из Японии Ямада и Мита [82] и ученых из Германии Крисманна и Кюрце, исследовавших процесс анодного оксидирования в искровом разряде [83-85].

Таким образом, с 1980-х годов активно развивалась технология получения МДО-покрытий, в том числе с применением щелочных электролитов и применение импульсного тока вместо постоянного тока. Это позволило повысить эффективность процесса и качество получаемых покрытий, что сделало возможным коммерциализацию процесса.

В настоящее время такие компании как Keronite (Великобритания), Magoxide-coat (Германия) и Microplasmic (США) активно применяют МДО-покрытия для улучшения трибологических свойств сплавов из металлов

вентильной группы. На сегодняшний день интерес к технологии МДО не снижается, о чем свидетельствует ряд монографий [86-90].

1.3. Современное состояние исследований процессов, режимов МДО и их влияние на качество получаемых покрытий.

В настоящее время проведено большое количество фундаментальных исследований и работ по конкретизации представлений о физике искрения на аноде [42, 44, 47, 52, 63, 67, 73, 74, 82, 83]. Однако, на сегодняшний день, ещё не выработано единое представление о теоретической модели процесса МДО. Опираясь на результаты исследований Гюнтершульце [91], отечественные ученые [92] выяснили, что, если продолжить анодные формовочные кривые (Рисунок 1.9) для зоны более высоких напряжений, то за относительно небольшими зонами анодирования 1 и искрового разряда 2 следуют более масштабные зоны микродугового 3 и дугового разрядов 4, в которых при определенных условиях можно сформировать МДО-покрытия. Аналогичные кривые были получены зарубежными специалистами при исследовании стадий образования МДО-покрытий на металлах вентильной группы (Рисунок 1.10) [93].

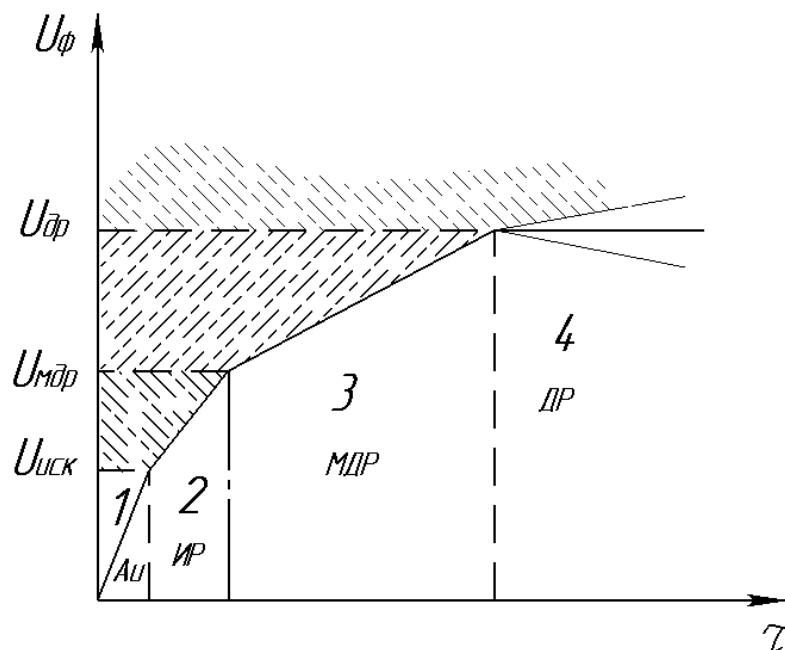


Рисунок 1.9.

Полная формовочная кривая напряжения при МДО

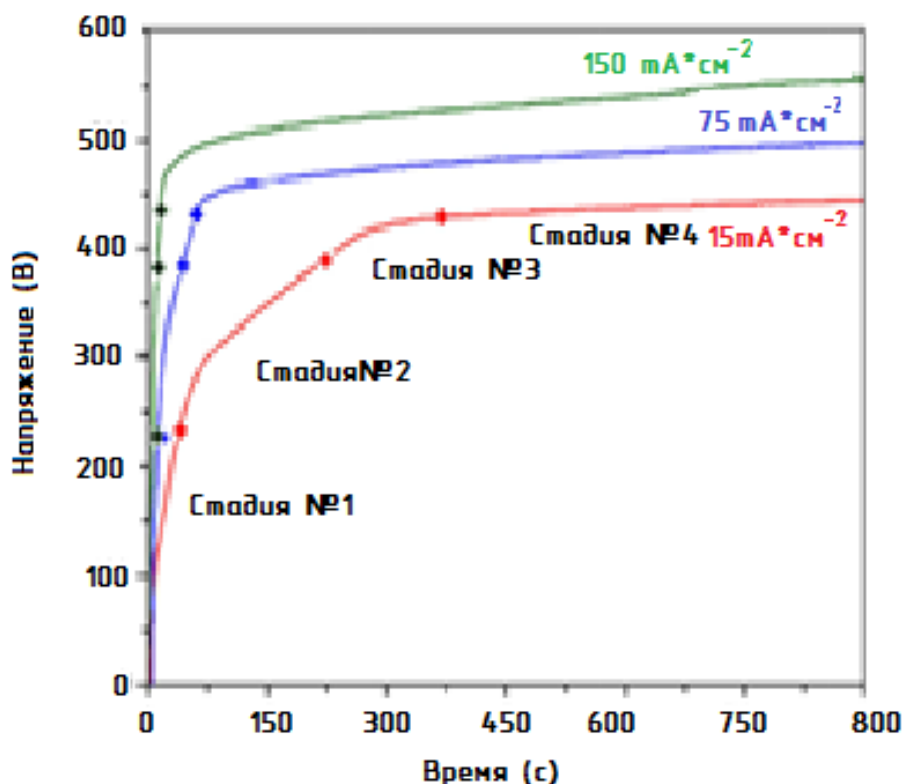


Рисунок 1.10.

Напряжение и время обработки МДО сплава АМ50

Так, например, Г.А. Марков определял физические явления, происходящие в процессе МДО, следующим образом: это комплекс дифференцированных процессов, общим характерным признаком которых является наличие высокотемпературных химических реакций совместно с перемещением вещества внутри электрической дуги между электродами, которые обладают электронной или ионной проводимостью. Процесс перемещения вещества в электрический разряд из электролита, в совокупности с высокотемпературными реакциями в разряде и зонах возле него, вызывает выделение газообразных продуктов [47].

МДО можно рассматривать, как комбинацию анодирования (электролитического окисления) и процессов плазменного разряда. Основные сходства между МДО и анодированием, заключаются в том, что оба процесса включают окисление субстрата с использованием электролитической ванны, началом стадии процесса МДО является процесс анодирования [94]. Исходя из графиков зависимости напряжения и времени обработки металлов вентильной

группы, можно выделить четыре последовательные стадии формирования МДО-покрытия.

Стадия №1. Представляет собой химическое взаимодействие металла подложки и образующегося покрытия с электролитом. Происходит быстрое электрохимическое образование исходного оксидного изоляционного материала. Из-за увеличения толщины оксидной пленки происходит рост электрического сопротивления [63]. На данном этапе пробой отсутствует. Покрытие, формируемое вследствие анодного режима, является беспористым. Эту стадию процесса МДО на участке формовочной кривой принято называть «фарадеевской областью».

Стадия №2. Происходят электрохимические процессы, которые начинаются до возникновения электрического разряда в тех областях, где в данный момент нет электрического разряда. Скорость роста напряжения уменьшается. По наличию многочисленных искр (Рисунок 1.11), быстро движущихся по всему образцу, можно сделать вывод о начале распада оксидного слоя, повышения температуры и о начале плавления металла основы (подложки). На данной стадии совместно происходит два процесса: электрохимическое окисление по всей площади образца и разрыхление возникающими искровыми разрядами образующегося покрытия. Из-за недостаточно толстой оксидной пленки возникает только искровой разряд. Далее, при увеличении толщины оксидной плёнки (в случае алюминия более 2 мкм), искровой разряд начинает переходить в микродуговой [47].

Стадия №3. Рост напряжения замедляется. На данной стадии разряды становятся более крупными и медленно движущимися (Рисунок 1.11). Цвет разрядов меняется от белого к жёлтому, а потом, постепенно, становится оранжевым. Вследствие роста оксидного слоя увеличивается электрическое сопротивление покрытия и в определенной области напряжений и плотностей тока происходят микродуговые разряды. Далее, в зонах превышения определенных значений электрического напряжения и плотности тока микродуговой разряд начинает превращаться в дуговой, что приводит к

увеличению яркости разрядов и изменению характера возникновения на поверхности.

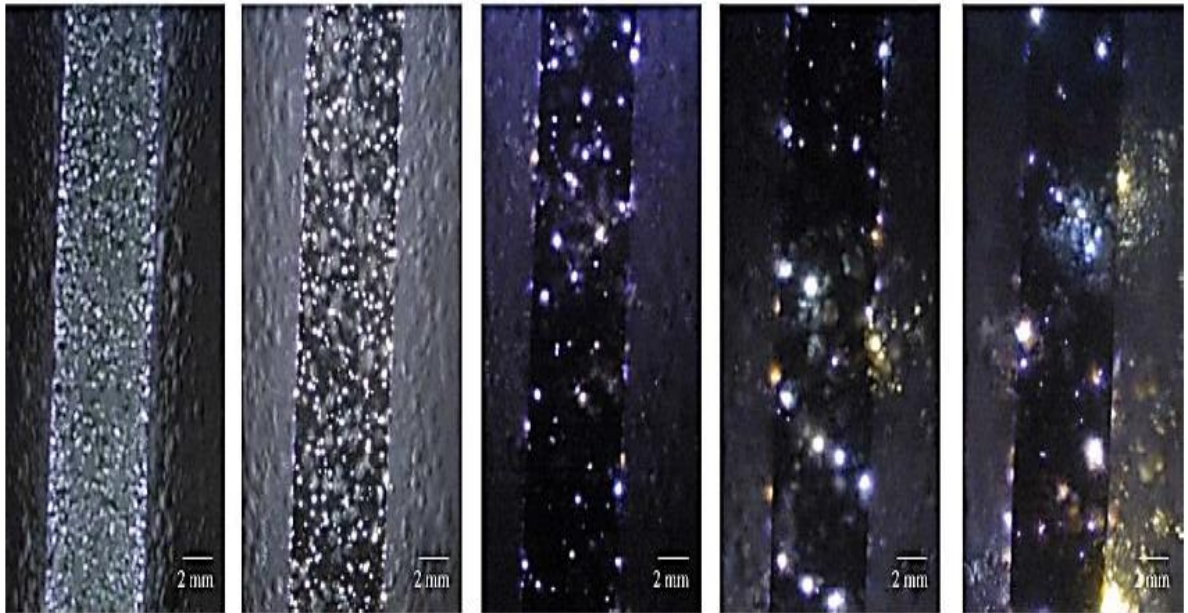


Рисунок 1.11.

Изображение процесса микродугового оксидирования, через 0 мин., 1 мин., 15 мин., 45 мин., 100 мин. [94]

Стадия №4. Скорость изменения напряжения медленнее, чем на стадии №3. Концентрированные разряды появляются в виде относительно больших и длительных искр, цвет искр остается оранжевым. Физически – это превращение микродугового разряда в дуговой. При этом перенос заряда между поверхностью основы (подложки) и электролитом проходит по схеме металл-оксид-разряд-электролит посредством плазмы, имеющей ионную проводимость. Ток на этой стадии МДО проходит в основном по разрядным каналам [95].

Выбрав в качестве граничного значения превращения микродугового разряда в дуговой ток единичного разряда величиной равной 30 мА (полный диапазон 1–30 мА), Марков определил [47], что при образовании анодных микродуговых разрядов между оксидным покрытием и электролитом, происходит разогрев пленки в анодном пятне до 1000–2000 °С. При переходе разряда из микродугового в дуговой ток единичного разряда возрастает в 2–2,5 раза

(диапазон значений от 30 до 600 мА), а температура поднимается до величины около 5000 °С.

Во время процесса МДО имеют место различные типы микроразрядов. Предлагаются различные модели для описания формирования микроразряда во время МДО, таких как электролиз тлеющего разряда [96], электронная лавина [97], механизм дугового разряда [98], модель, предполагающая, что возможность генерации свободных электронов и зажигания тлеющего разряда в газообразных средах происходит в паровой прослойке между электролитом и материалом подложки [99]. Однако, из-за того, что разряды являются недолговечными, это чрезвычайно затрудняет их изучение, и до сих пор существуют разногласия по поводу теоретического описания разрядов и механизмов роста покрытия.

В последнее время для исследования плазмы используется оптическая эмиссионная спектроскопия. Было обнаружено, что электролит (как правило, содержащий Н, ОН, Na и К) участвует в плазменном разряде во время процесса МДО. Спектры излучения плазмы показали, что существуют две отдельные области плазмы, центральное ядро с высокой температурой ($\sim 16\,000 \pm 3500$ К), с высокой электронной плотностью ($N_e \sim 5 \cdot 10^{17}$ см⁻³) и более холодная (~ 3000 - 4000 К), с меньшей плотностью ($N_e \sim 5 \cdot 10^{15}$ см⁻³), периферическая область, вероятно, простирающаяся в окружающий электролит [94, 95].

При изучении колебаний интенсивности и температуры плазмы в процессе МДО установлено, что покрытие формируется разными типами разрядов, которые возникают на поверхности в зоне раздела «металл/покрытие» (тип В), внутри верхнего слоя покрытия (тип С) и снаружи покрытия в зоне раздела «поверхность/электролит» (тип А) [94, 95]. Разряды типа В являются причиной высокого уровня пиков температур (до 10000 К). Разряды типа А и С создают базовый температурный профиль (~ 4500 К).

Сильные разряды приводят к расплавлению большего количества металла и сформировавшегося на его поверхности оксида. Расплавленный материал выбрасывается на поверхность. Формируются крупные керамические частицы.

Из-за охлаждения расплава электролитом на покрытии образуются микротрещины. Вокруг поры наблюдается расплав оксидов, что свидетельствует о том, что разряды имеют мощность, достаточную для проплавления покрытия до металла основы. Температура микроаряда в околоразрядной области может подниматься до нескольких тысяч градусов. Происходит попеременное горение разрядов на поверхности покрытия и на поверхности металла. Кратер дугового разряда, в общем случае, наполняется расплавленным материалом покрытия перед началом кристаллизации, однако, при достижении определенных значений напряжения, происходит разрушение покрытия [94].

Следует отметить, что современные методологии рассматривают МДО как три одновременных процесса, а именно: электрохимический, плазмохимический (в ряде публикаций МДО называют плазменно-электролитическое оксидирование) и термическая диффузия кислорода [94].

Основные электрохимические реакции происходят на границе раздела покрытие/электролит, через различные механизмы в зависимости от электролита. По данным исследования, проведенного Ерохиным и др. [99, 100], оксидный слой формируется вследствие ионной составляющей тока, который передается через поверхностные разряды, а также при анодировании, током, проходящим по свободной от разрядов поверхности.

Плазмохимия поверхностных разрядов имеет довольно сложную природу. С одной стороны, заряд переносится на основу (подложку) из электролита, с другой стороны, наблюдаются эффекты ионизации между поверхностью подложки и электролитом при прохождении заряда через оксидный слой при помощи плазмы.

Термодиффузионные процессы вносят вклад в рост покрытия. Диффузия кислорода в подложку сплава играет ключевую роль в росте покрытия. На скорость роста влияет температура плазмы, которая увеличивает скорость переноса кислорода к подложке [95].

В процессе МДО с применением переменного тока электрический разряд горит как в анодном, так и в катодном полупериодах. Катодный разряд обладает электронной проводимостью, характеризуется большей яркостью и более высокой

температурой, чем анодный разряд. Для анодно-катодного процесса характерным является то, что катодные разряды возникают при меньших значениях напряжения, при сохранении температуры и типа проводимости. Особенностью анодного разряда является то, что он горит на покрытии, ранее подогретом катодным разрядом. При анодном разряде покрытие обладает униполярной проводимостью. В сравнении с анодным, анодно-катодный режим позволяет получить более мягкий режим образования двухслойного покрытия. Такие покрытия имеют внешний пористый «технологический» слой и внутренний более твёрдый и менее пористый «рабочий» слой.

Фазовую границу между электролитом и парогазовой прослойкой принято называть квази-катодом. В процессе анодирования в искровом или микродуговом разряде падение напряжения приходится на небольшую зону между анодом и квази-катодом (Рисунок 1.12). В данной области формируется высокая напряжённость электрического поля, около 10^6 В/м, следствием которой является разряд, происходит ионная бомбардировка, ускорение анионов, процесс ударной ионизации и т.п. В районе поверхности анода идет возникновение квази-катада, которое приводит к равномерной поляризации деталей и формирует покрытие однородное по толщине.

При микродуговом оксидировании длительность анодных разрядов превышает время существования искрового разряда. Это говорит о таунсендовском механизме пробоя разрядного промежутка, характерного для тлеющего разряда [101]. Если исследуемый электрод является катодом, то наблюдается искровой разряд, переходящий в дуговой. В работе [102] говорится о том, что разряд, возникающий между анодом и электролитным катодом, является тлеющим и не переходит в дуговой разряд.

Для определения электрических свойств разряда в анодно-катодном режиме МДО были получены вольтамперные характеристики (ВАХ) в анодный и в катодный полупериоды на образцах из алюминиевого сплава Д16 с МДО-покрытием толщиной 10 мкм, 100 мкм, а также без покрытия, непосредственно в электролите (Рисунки 1.13, 1.14).

Анализ графиков показывает, что в анодный и катодный полупериоды разряд имеет разный характер. Анодный разряд, скорее всего, является тлеющим разрядом контрагированного типа, в свою очередь катодный разряд при высоких токах становится дуговым [103].

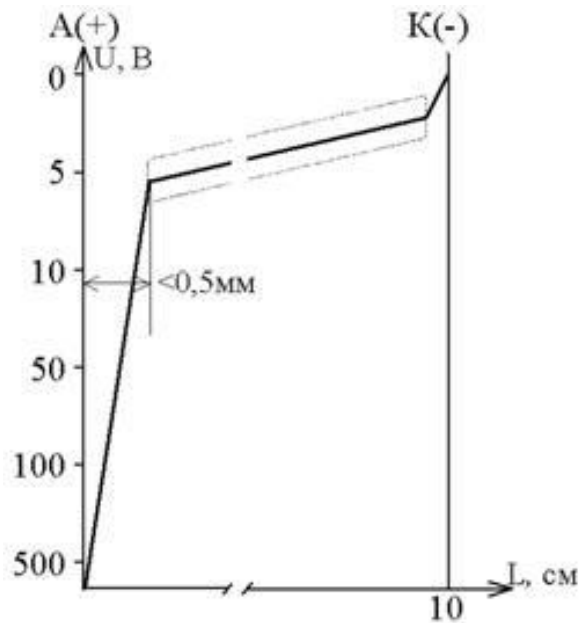


Рисунок 1.12.

Напряжённость электрического поля между анодом и катодом

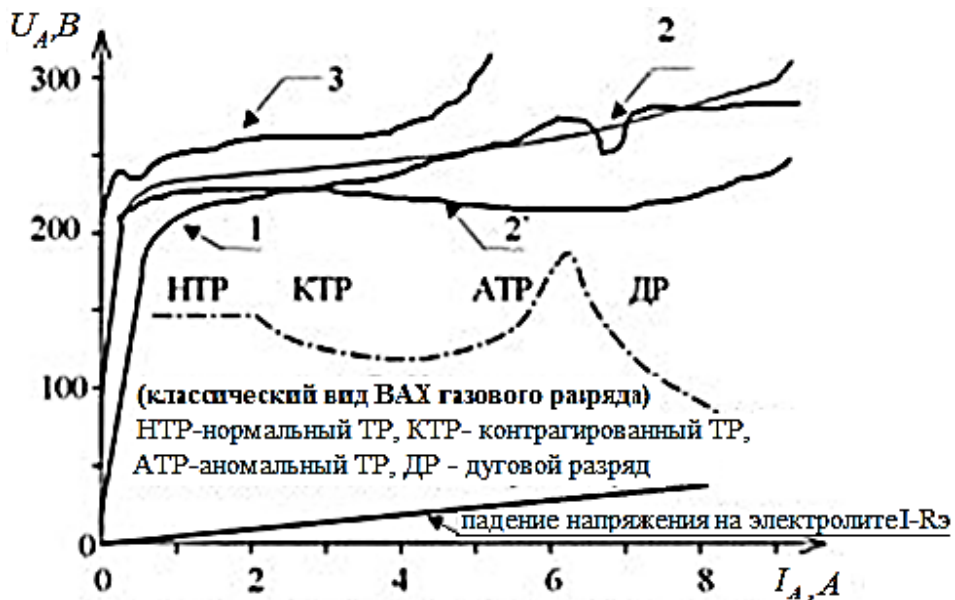


Рисунок 1.13.

График анодных статических вольтамперных характеристик разряда при МДО

- 1- Образец без покрытия; 2- $h_{покр}=10$ мкм; 3- $h_{покр}=100$ мкм;
2*- истинная ВАХ для случая 2 (за вычетом $I \cdot R_{э}$)

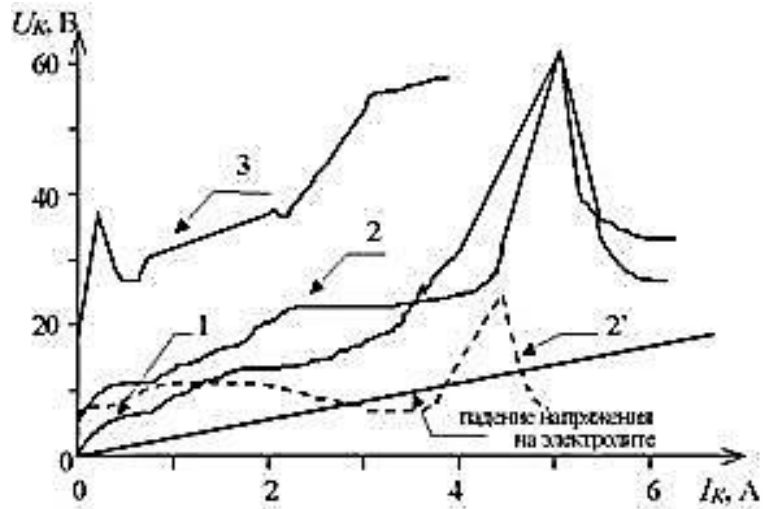
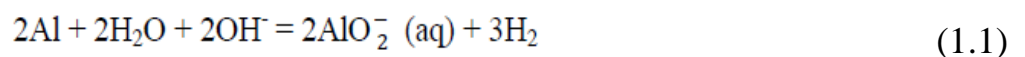


Рисунок 1.14.

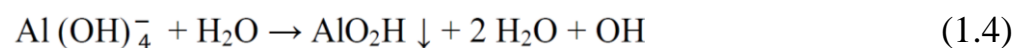
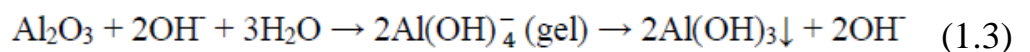
График катодных статических вольтамперных характеристик разряда при МДО

Рассмотрим различные химические реакции, наблюдающиеся в процессе проведения МДО в щелочных растворах с использованием различных типов токов. В таком процессе наблюдается три нижеизложенных периода.

1. Период, когда импульс тока выключен (t_{off}). Во время t_{off} (Рисунок 1.15, с), когда не приложен ток, химические реакции могут вытравить алюминиевую подложку и выпустить ионы алюминия. В электролите происходят следующие химические реакции [104-106]:



Толщина оксида алюминия может уменьшаться в процессе химического растворения и может быть получен бёмит ($\gamma\text{-AlO}(\text{OH})$).



Гидроксид алюминия может быть повторно растворён:



Так же может произойти окисление алюминия:



Исходя из этого набора реакций, можно сделать вывод, что поверхность заготовки является только химически растворенной реакциями с (OH^-) [50], и скорость растворения будет увеличиваться, когда температура электролита повышается за счет выделяющегося при этом тепла [51].

2. Анодный период (t_{on}^+). В течение этого периода (Рисунок 1.15, с и d) заготовка служит анодом, а разряд происходит под действием высокого электрического поля над поверхностью заготовки, что является причиной возникновения пробивного напряжения. Выделение кислорода происходит за счет окисления воды:



Под воздействием электрического поля происходит ионизация кислорода и анионы кислорода (O^{2-}) диффундируют к подложке и вступают в реакцию с катионами алюминия (Al^{3+}) и образуется оксид алюминия:

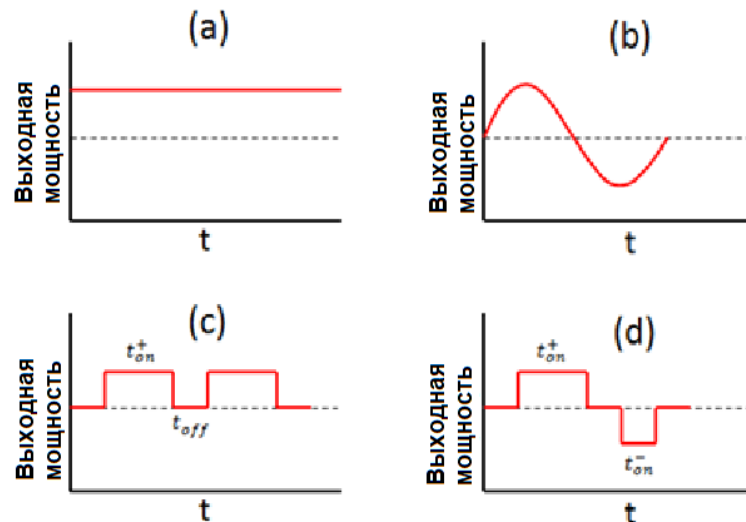


Рисунок 1.15.

Различные типы режимов тока, используемых в МДО: а) постоянный ток (DC); б) переменный ток (AC); в) униполярный импульсный ток; г) биполярный импульсный ток

Некоторые катионы могут быть выброшены в электролит и вступать в реакцию с гидроксидом или веществами, содержащимися в электролите, например, с силикатами:



Анодное растворение металла приведет к выделению катионов в электролит:



3. Катодный период ($t_{\text{он}}$). В течение этого периода (Рисунок 1.15, d) катионы притягиваются к отрицательно заряженной подложке, анионы отталкиваются, и может произойти осаждение.



Отметим в заключение, что в случае нейтральных или щелочных электролитов может происходить выделение водорода:



Остановимся на основных факторах процесса МДО, влияющих на качество покрытий. Это материал основы (подложки), химический состав электролита, режимы и время проведения процесса. Они и являются определяющими факторами МДО, которые существенно влияют на состав, структуру и эксплуатационные характеристики получаемых МДО-покрытий.

Тип применяемого режима тока влияет на характеристики поверхностного разряда, такие как интенсивность и плотность. Эти характеристики разрядов играют ключевую роль в определении микроструктуры покрытия, толщины, шероховатости, степени пористости, твердости и скорости роста покрытия [107].

Режим постоянного тока (DC) (Рисунок 1.15, а) используется только для компонентов простой формы при получении тонких покрытий. Такой режим предполагает ограниченный контроль процесса из-за сложности в регулировке характеристик разряда. Использование режима переменного тока исключает

дополнительную поляризацию электрода и улучшает возможность управления процессом с помощью прерывания дуги. Кроме того, использование несбалансированного режима переменного тока, в котором положительные и отрицательные сегменты имеют различные амплитуды, позволяют улучшить контроль процесса нанесения покрытия. Тем не менее, ограничение по мощности (которая обычно составляет менее 10 кВт) и частоте тока являются недостатками, которые ограничивают коммерческое масштабирование этого режима [108, 109].

Применение импульсного режима постоянного тока позволяет контролировать длительность разряда. Импульсная форма позволяет более эффективно использовать имеющуюся мощность за счет снижения энергопотребления, вызванного интервальным разрядом. В процессе отработки выявлено, что биполярный импульсный режим производит более плотные МДО-покрытия на алюминии с меньшим количеством дефектов и более равномерной толщиной покрытия [110, 111].

А. Л. Ерохин сравнивал свойства МДО-покрытий, сформированных на сплавах алюминия в режиме переменного тока частотой 50 Гц и в импульсном биполярном режиме постоянного тока [108]. Результаты исследований свидетельствуют о том, что покрытие, полученное в импульсном биполярном режиме, имело более качественную морфологию. Кроме того, толщина «технологического» слоя уменьшается по сравнению с покрытиями, полученными в режиме с использованием переменного тока.

С помощью оптической эмиссионной спектроскопии были сделаны выводы, что применение импульсного биполярного режима привело к уменьшению разрядов сильной интенсивности типа В и задержке их формирования. Разряд типа В является самым сильным среди различных типов разрядов, описанных ранее в данном разделе. Уменьшение разрядов типа В при применении импульсного биполярного режима тока обусловлено изменением полярности и уменьшает негативные эффекты, связанные с наличием таких разрядов [109].

Плотность тока является одним из важных параметров, влияющих на свойства МДО-покрытия. Как правило, значения плотности тока лежат в

диапазоне от 1000 до 3000 А/м². Изменение плотности тока может повлиять на состав, микроструктуру, скорость роста и физико-химические свойства покрытий. Для алюминиевых сплавов увеличение плотности тока повысило скорость роста покрытия и привело к относительному повышению содержания α -Al₂O₃ (термодинамически стабильной фазы с самой высокой твердостью).

Для импульсных токовых режимов (Рисунки, 1.15 с и d) параметры импульса имеют возможность регулировки и обеспечивают большую гибкость в управлении процессом. Интенсивность появления разрядов зависит от энергии каждого импульса, которая, в свою очередь, увеличивается при использовании более высоких токов и более длительных периодов воздействия. Одиночный импульс энергии (E_p) определяется как:

$$E_p = \int_0^{t_{on}} U_p \cdot I_p dt, \quad (1.14)$$

где U_p -импульсное напряжение;

I_p – импульсный ток;

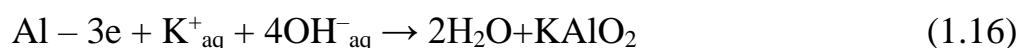
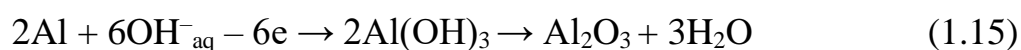
t_{on} – время импульса.

Установлено так же [112], что увеличение импульса по времени интенсифицирует фазовый переход от γ к α -Al₂O₃ и приводит к различному распределению элементов в покрытиях. Известна и роль времени проведения процесса. Влияние времени обработки обусловлено тем, что его длительность приводит к росту толщины покрытия. При длительной обработке возникают более интенсивные и более крупные микроразряды, которые находятся на более удаленном расстоянии друг от друга и приводят к огрубению поверхности покрытия из-за образования относительно крупных пор. Тем не менее, и состав электролита играет очень важную роль в процессе МДО. Электролит способствует пассивации металла и создает тонкую изолирующую пленку, которая требуется для пробоя диэлектрика, чтобы вызвать появление разрядов. Он необходим для того, чтобы проводить ток и передавать необходимую для процесса энергию, а также для обеспечения необходимого

количества кислорода для окисления. Компоненты, присутствующие в электролите, могут быть включены в покрытия и влиять на их свойства.

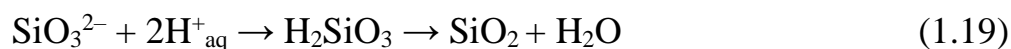
Электролиты, используемые в технологии получения МДО, обычно разделяют на две группы.

К первой группе относят электролиты, которые не содержат химические элементы, образующие нерастворимые оксиды, например, растворы щёлочи или серной кислоты. При формировании МДО-покрытий с использованием данных электролитов происходит рост покрытий вглубь металла по причине его окисления:



В данном случае KAlO_2 входит в состав МДО-покрытия в виде $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ [88].

Ко второй группе электролитов можно отнести алюминатные и силикатно-щелочные растворы. В этих электролитах присутствуют катионы и/или анионы, в состав которых входят элементы, образующие нерастворимые оксиды. Такие элементы при включении в состав МДО-покрытия обеспечивают дополнительный прирост толщины после формирования оксидного слоя. С участием катионов и анионов второй группы электролитов может осуществляться гидролиз элементов, входящих в электролит, с последующим термолизом продуктов гидролиза в области разряда [88]:



Также разделяют электролиты по показателю кислотности, количеству компонентов в электролите и по тому относится ли данный электролит к растворам или суспензиям.

В первую группу входят:

- кислые электролиты, например, электролиты на основе серной и фосфорной кислот [50, 74];

- щелочные электролиты на основе едкого калия и гидролизующихся солей (Na_2SiO_3 , NaAlO_2) или их смесей [113];

- нейтральные электролиты на основе негидролизующихся солей (NaCl) [114].

Во вторую группу входят:

- однокомпонентные электролиты, такие как, силикатные (на основе растворов жидкого стекла $m\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$) или силикатов щелочных металлов ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) или имеющих модуль $M = \frac{n}{m} = 2 - 4$;

- двухкомпонентные силикатные электролиты с добавкой щелочи ($\text{KOH} + \text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) [113];

- трёхкомпонентные электролиты, содержащие растворимые алюминат, гексаметафосфат и щёлочь ($\text{KOH} + \text{Na}_6\text{P}_6\text{O}_{18} + \text{NaAlO}_2$) или растворимые молибдат, силикат и щёлочь ($(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} + \text{K}_2\text{SiO}_3 + \text{KOH}$) [113];

- многокомпонентные, в общем случае содержащие растворимые ортофосфат, гидрокарбонат, силикат и щёлочь ($\text{K}_3\text{PO}_4 + \text{KHCO}_3 + \text{K}_2\text{SiO}_3 + \text{KOH}$) [113].

Электролиты-суспензии вызывают особый интерес, так как могут придать МДО-покрытиям специфические эксплуатационные свойства, благодаря наличию в их составе различных нерастворимых соединений, из которых происходит внедрение элементов в покрытие (TiO_2 , TiN , SiC , SiO_2 , Al_2O_3 , BN) [115, 116].

На практике наиболее часто используются щелочные электролиты, содержащие силикат натрия. При использовании электролита, содержащего от 2 до 20 г/л Na_2SiO_3 и от 2 до 4 г/л KOH , утолщается внутренний плотный слой в покрытии, который в основном состоит из γ - и α - Al_2O_3 с некоторыми сложными фазами Al-Si-O . Кроме того, при изменении концентрации было показано, что KOH и Na_2SiO_3 влияют на реакцию напряжения-времени и влияют на наступление пробивного напряжения. Увеличение концентрации силиката натрия, в целом, приводит к увеличению скорости роста покрытия, что может быть связано с включением соединений кремния в покрытие.

В недавних исследованиях [117] было выявлено влияние скважности поляризационного сигнала на химический состав, толщину и свойства образующихся оксидных покрытий (Рисунок 1.16). МДО-покрытия, сформированные при больших значениях рабочего цикла скважности и времени окисления, могут выдерживать существенно больше циклов истирания. С увеличением количества потребляемой электроэнергии для создания покрытия образуются более толстые слои МДО, что способствует улучшению трибологических свойств. Установлено, что увеличение рабочего цикла скважности поляризационного сигнала приводит к уменьшению кажущейся пористости образующихся слоев МДО, образованию большего количества алюминия и карбидов молибдена в их составе, что приводит к увеличению износостойкости и твердости покрытий.

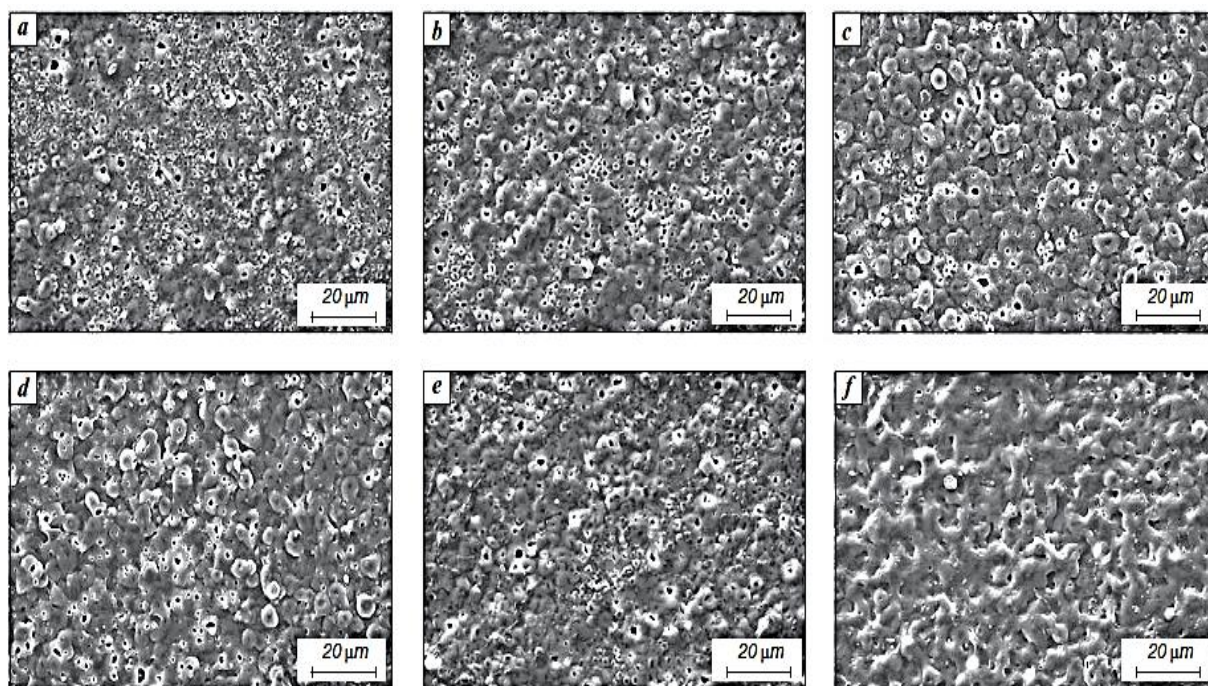


Рисунок 1.16.

МДО-покрытия, сформированные на сплаве Д16 в течение 30 мин (a, b, c) и 60 мин (d, e, f) при рабочем цикле (D) 0,06 (a, d); 0,12 (b, e), 0,21 (c, f) [117].

1.4. Постановка задачи

Направление диссертационных исследований было сформулировано в соответствии с планом научных исследований и согласовано с научным руководителем. На первом этапе совместно с соавторами были выполнены экспериментальные работы, опубликованные по мере оформления их результатов [13-19, 21, 22, 24-29, 118, 119].

В процессе исследований особое внимание уделено стойкости покрытий, полученных выбранным МДО-методом. Особое внимание необходимо уделить методам математического описания разрушения МДО-покрытий при экспериментальных исследованиях, с учетом опыта моделирования механических воздействий в различных отраслях техники [120, 121]. При этом, необходимо исходить из того, что различный механизм воздействия на поверхность металла удара и фреттинга показывают разный характер повреждения контактных зон. Тем не менее, оба вида воздействия могут привести к значительным изменениям контактирующих поверхностей. Так, после испытания на удар, на поверхности видны следы пластической деформации, которые можно увидеть в виде скопления материала по краям контактной зоны (Рисунок 1.17 а). Фреттинг-износ аналогичных исследуемых образцов показывает разрушение поверхности из-за адгезионного износа. Материал вырывается из поверхности, и прижимается назад или прилипает к ответной контактной детали (Рисунок 1.17 б).

Остановимся более детально на эффектах, которые наблюдаются в условиях выведения КА на целевую орбиту. В этом случае, как правило, присутствуют совместные комбинированные воздействия микроударной и фреттинговой нагрузки. Вклад вида нагрузки в износ контактирующих поверхностей влияет на вид пятна контакта. Для случая с образцами, имеющими МДО-покрытие, на начальном этапе вибронагружения диаметр пятна контакта d определяется упругой деформацией контактирующих поверхностей и на порядок меньше перемещений упора S , происходящих вследствие вибрационного воздействия на узел раскрытия (Рисунок 1.18). Можно заключить, что МДО-покрытие пластины

эффективно работает в условиях микроударного нагружения. По мере появления площадки износа МДО-покрытия диаметр пятна контакта d' увеличивается, причём приращение перемещения упора $r = S' - S$ незначительно по сравнению с увеличением диаметра пятна контакта. В итоге, диаметр пятна контакта d' и перемещение упора S' становятся сравнимыми величинами, усилия воздействия на МДО-покрытие распределяются на большую площадь и дальнейший износ МДО-покрытия идёт в условиях фреттинга [118].

Результаты исследований ЕКА по устойчивости твёрдосмазочных покрытий на основе дисульфида молибдена позднее были положены нами в основу экспериментов, проведенных для условий совмещения фреттинга и микроудара [29]. При изучении контактировавших поверхностей (виды зоны приведены на Рисунке 1.18), например, после проведения виброиспытаний визуально наблюдался значительный износ покрытия ВНИИ НП-230 ТУ 38-101558-75 на основе дисульфида молибдена, сформированного на поверхности упора из стали 12Х18Н10Т, при контакте с пластиной из АМгб.М с МДО-покрытием (Рисунок 1.19) и пластиной из титанового сплава ВТ6 (Рисунок 1.20) [119].

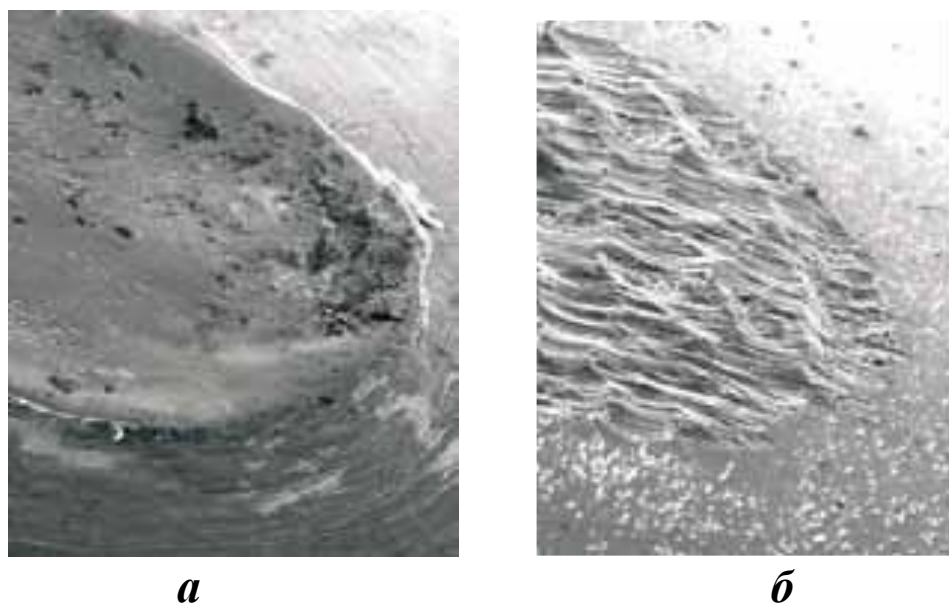


Рисунок 1.17.

Поверхность оси после удара (а) и истирания (б)

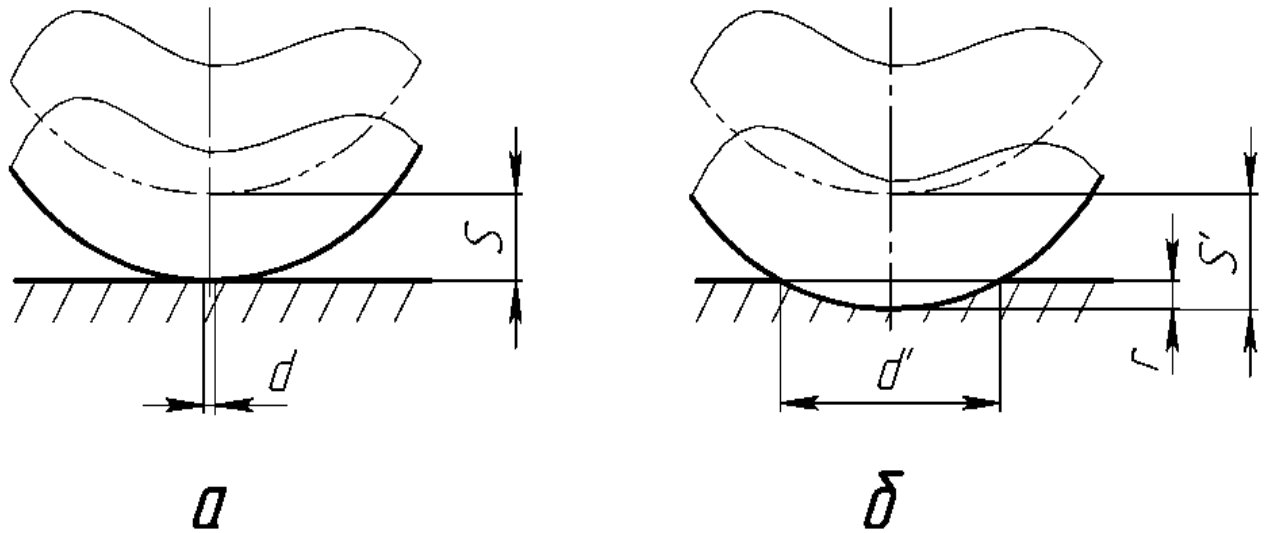


Рисунок 1.18.

Зона контакта поверхностей при микроударе (а) и фреттинге (б)

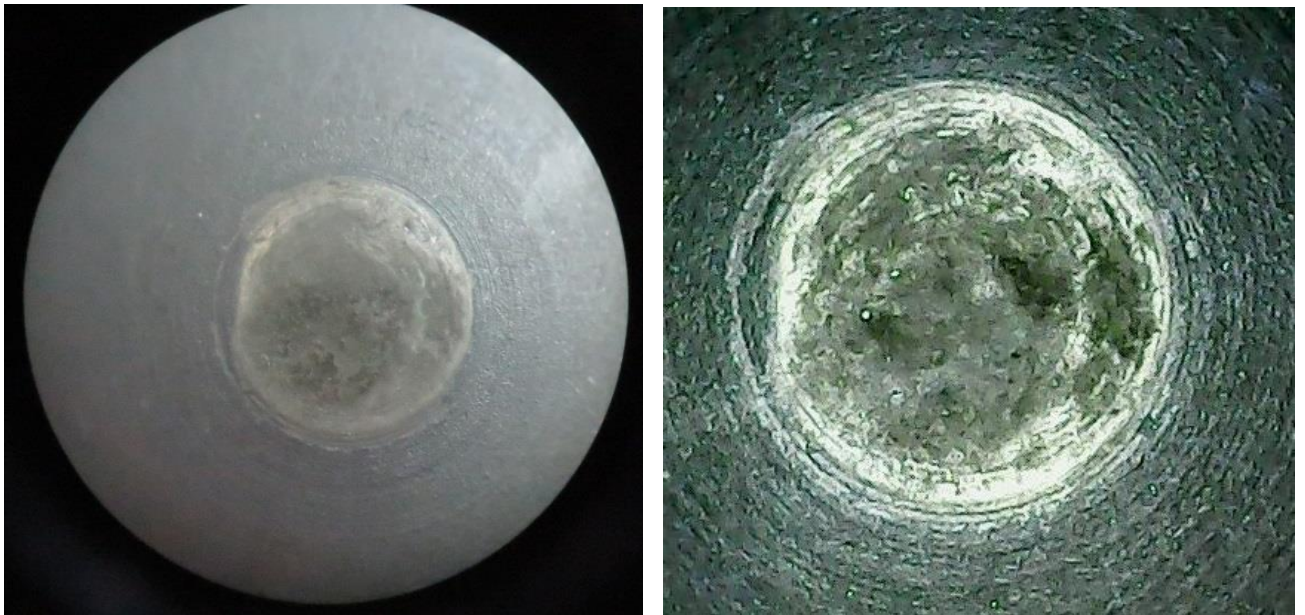


Рисунок 1.19.

Морфология зоны износа покрытия ВНИИ НП-230 ТУ 38-101558-75 на основе дисульфида молибдена, сформированного на поверхности упора из стали 12Х18Н10Т, после проведения вибрационных испытаний в паре с ответной пластиной из АМгб.М с МДО-покрытием

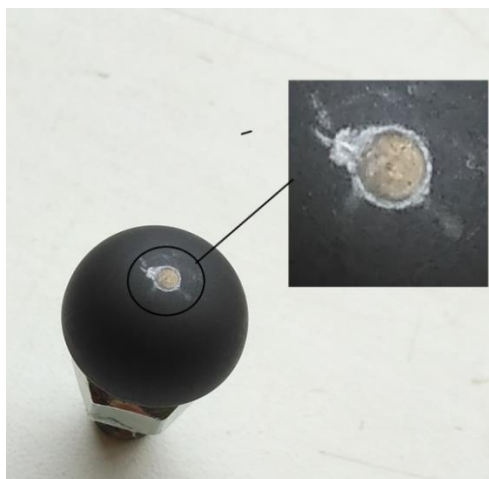
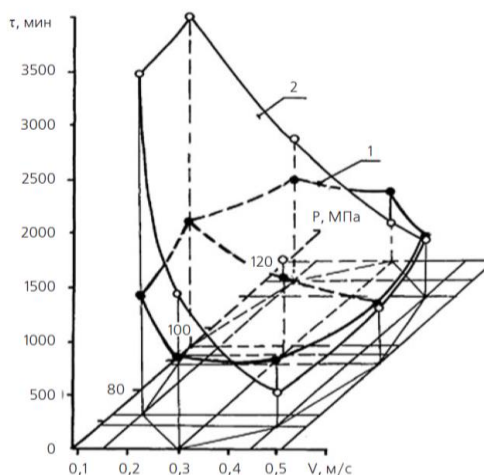


Рисунок 1.20.

Морфология зоны износа покрытия ВНИИ НП-230 ТУ 38-101558-75 на основе дисульфида молибдена, нанесенного на поверхность упора из стали 12Х18Н10Т, после проведения вибрационных испытаний в паре с ответной пластиной из титана

Результаты эксперимента коррелируют с данными по зависимости ресурса твёрдосмазочных покрытий от скорости воздействия и нагружения (Рисунок 1.21, 1.22) [122]. Ресурс твёрдосмазочных покрытий (ТСП) снижается при нагружении, поэтому в случае микроудара стремится к минимуму.



—○— — в условиях вакуума ($p \sim 4$ мПа);
—●— — в нормальных атмосферных условиях

Рисунок 1.21.

Графическая интерпретация влияния нагрузочно-скоростных факторов на долговечность трения с ТСП ВНИИ НП-212

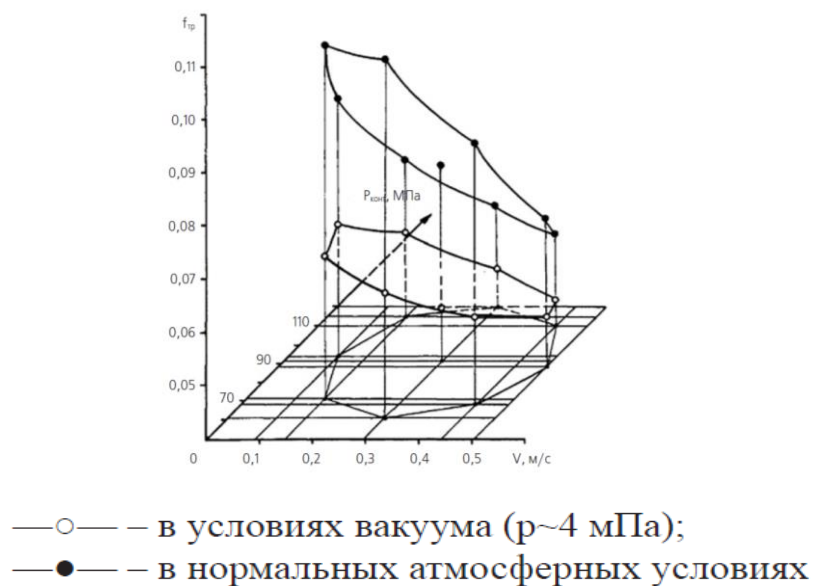


Рисунок 1.22.

Графическая интерпретация влияния нагрузочно-скоростных факторов на силу трения пары с ТСП ВНИИ НП-212

Приведенные выше аналитические исследования позволяют заключить, что основными направлениями при постановке задач являются:

- изучение физических свойств и морфологии МДО-покрытий, полученных на основах (подложках) из различных сплавов алюминия;
- апробацию расчетных методов описания воздействия комбинированных фреттинг- и микроударных нагрузок;
- определение зависимостей прочностных свойств МДО-покрытий от физических параметров материала основы (подложки) при комбинированных фреттинг- и микроударных нагрузках;
- определение зависимостей прочностных свойств МДО-покрытий от толщины покрытия при комбинированных фреттинг- и микроударных нагрузках;
- апробация методов исследования физических характеристик МДО-покрытий;
- определение направлений совершенствования эксплуатационных характеристик МДО-покрытий для условий применения в системах КА.

В диссертационной работе уделено внимание детальному анализу полученных автором научно-исследовательских и теоретических результатов в

области материаловедения. Для этой цели необходимо было решить ряд сопутствующих прикладных задач:

1. Исследовать особенности формирования МДО-покрытия на поверхностях контактирующих пар узлов раскрытия КА от режимов и состава электролита.
2. Изучить влияние толщины МДО-покрытия на характер его разрушения и установить зависимость степени его разрушения от свойств материала основы (подложки).
3. Исследовать влияние площади контакта взаимодействующих элементов на характер разрушения МДО-покрытия.
4. Установить экспериментальные и математические зависимости, объясняющие влияние геометрических параметрами и физических свойств контактирующих поверхностей на стойкость МДО-покрытия при воздействиях, имитирующих выведение КА РН.

Выводы по Главе 1

1. Выполненный аналитический обзор результатов исследований (в том числе проведенных автором) по устойчивости материалов, применяемых в узлах КА, к воздействиям РН подтвердил важную роль подбора контактирующих пар материалов для защиты изделий от адгезии в вакууме.

Опубликованные данные отечественных и зарубежных исследователей о поведении твердых смазок на основе дисульфида молибдена в условиях внешних воздействий коррелируют с результатами исследований автора о недостаточной устойчивости данного покрытия при фреттинг-нагрузении и микроударе.

2. Выявленные и проанализированные результаты применения МДО-метода могут быть успешно использованы при поиске рациональных режимов формирования покрытий, предотвращающих адгезию при применении оксидированных алюминиевых сплавов в узлах раскрытия элементов КА.

3. Проведенный анализ факторов, влияющих на формирование МДО-покрытий, позволил сформулировать постановку задачи и определить направления исследований в диссертационной работе.

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОЛУЧЕНИЯ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ МДО

2.1. Основные преимущества выбранного метода оксидирования при получении локальных защитных покрытий

В соответствии с целями, поставленными в данной работе, защитные покрытия должны быть нанесены на контактирующие элементы узлов раскрытия КА. Все ранее разработанные защитные покрытия в условиях воздействия на элементы космической техники термических и механических нагрузок не во всех случаях удовлетворяли предъявленным требованиям [123-126].

В связи с этим, рассматривается метод МДО для исследований оптимизации его режимов при получении покрытий, в том числе в локальных зонах.

Особенностью локального МДО является то, что при оксидировании отдельных участков поверхности не отмечается ослаблений в местах оксидированной и неоксидированной поверхности. Это выгодно отличает данный метод, например, от термического оксидирования, при котором зона перехода упрочненного слоя в неупрочненный обладает различными механическими свойствами.

Для отработки методом МДО мест концентрации напряжений разработаны и применяются различные способы и средства. Многие из них являются конкурирующими в заданных условиях. На выбор способа и средства оксидирования конкретной детали влияет множество конструктивных, технологических, производственных и других факторов. Поэтому при разработке технологии местного оксидирования необходимо достаточно полно определить возможные варианты решения задачи, а затем выбрать из них наилучший.

Анодное окисление выполняется в растворе электролитов при высоких потенциалах, вызывающих протекание микроплазматических пробоев на аноде

(искрового разряда или микродуго).

Покрyтия, полученные таким способом, обладают рядом важных электрофизических свойств, в частности высоким электрическим сопротивлением, коррозионной стойкостью, повышенной твердостью.

Анодные пленки, полученные с использованием микродуговых разрядов в слабoкислых и щелочных электролитах, по составу и строению близки к оксидной керамике, что обуславливает их более высокую коррозионную стойкость в реакционных средах в сравнении с покрытием, полученным в доискровой области.

Определенные трудности при получении защитных покрытий электрохимическим способом связаны со случаями, когда необходимо покрыть не всю деталь целиком, а только определенную поверхность. В этом случае применение традиционных методов анодирования затруднено и приходится применять различные специфические методы.

Для получения частичного оксидирования на поверхностях деталей может быть применено:

- неполное погружение детали в электролит без защиты границы раздела;
- путем полного погружения детали в электролит с защитой границ раздела.

Кроме того, известен перспективный метод [127-129], предложенный В. К. Шаталовым и соавторами, позволяющий существенно упростить конструкцию технологического оборудования для оксидирования. Задача нанесения защитного МДО-покрытия на определенную поверхность решается применением перемещаемого устройства локального оксидирования. Предлагаемый способ оксидирования характеризуется следующими признаками [128]:

- электролит подается через поролон непосредственно к месту оксидирования поверхности детали;
- поролон, заполненный протекающим электролитом, удерживает большой объем электролита над обрабатываемой поверхностью;

- размер электрода обеспечивает величину площади, на которой идет процесс микродугового оксидирования.

Способ осуществляется следующим образом [127-129]. Образец с очищенной обезжиренной поверхностью устанавливается на противень для сбора стекающего электролита. Он же является анодом, а в качестве катода используется специально перемещаемое устройство с пластиной из нержавеющей стали.

На Рисунке 2.1 представлено компактное устройство для локального нанесения МДО-покрытий на экспериментальные образцы.

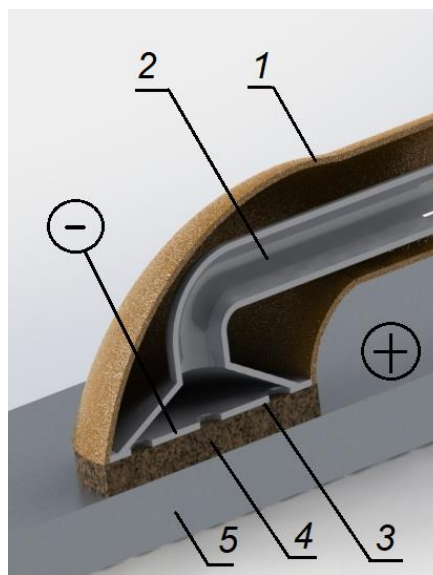


Рисунок 2.1.

Устройство для локального оксидирования.

1 – корпус, 2 – трубка подвода электролита, 3 – электрод, 4 – эластичный экран,
5 – обрабатываемая деталь

На корпусе (1) из винипласта или другого электроизолирующего материала находится электрод (3) из нержавеющей стали. Электролит по трубке (2) подается через экран (4) на деталь (5). При подаче напряжения на электрод и экспериментальный образец на поверхности, соответствующей площади электрода, возникают электрические разряды и идет процесс микродугового оксидирования. Электролит, прокачиваясь через поролон, омывает разрабатываемую поверхность, охлаждает деталь и стекает в противень. Перемещая устройство по поверхности экспериментального образца, получают

защитное оксидное покрытие либо на всей поверхности, либо в отдельных местах [127-129].

В экспериментальной модели был покрыт образец из титанового сплава ВТ6. Для поддержания плотности тока до 500 А/дм^2 использовалась установка мощностью 2,5 кВт. Для проведения процесса использован электролит в объеме 50 л, что существенно меньше, чем используется при существующих способах оксидирования.

Определенную трудность при получении защитных покрытий предложенным электрохимическим методом на поверхностях деталей вызывает тот факт, что на данный момент времени микродуговое оксидирование проводят вручную, перемещая электрод. Высокие энергетические характеристики процесса вызывают, особенно при многократном прохождении электрода, нагрев поверхностного слоя детали, испарение электролита в объеме до $0,06 \text{ дм}^3/\text{мин}$ и выделение газов с входящими в его состав компонентами реакции.

С целью выполнения технологических требований и условий МДО В. К. Шаталовым на базе МГТУ им. Баумана были проведены исследования, направленные на разработку устройства для оксидирования, которым можно получить анодные покрытия высокого качества и лишенного данного недостатка. Принципиальная схема такого устройства приведена на Рисунке 2.2.

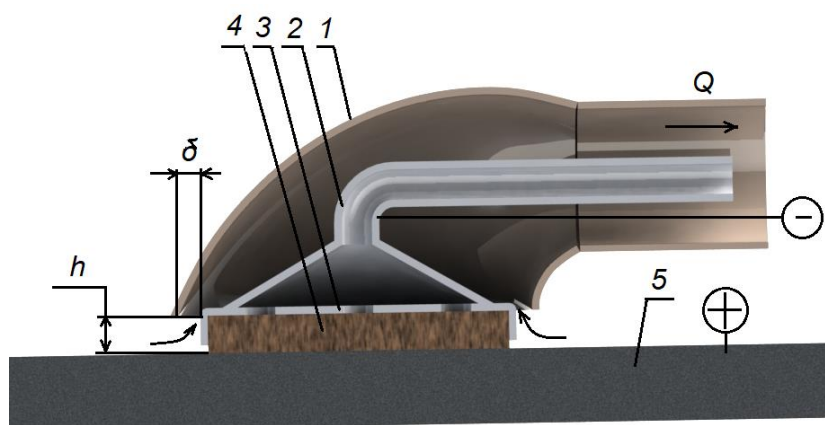


Рисунок 2.2.

Усовершенствованное устройство для локального оксидирования.

- 1 – отсасывающее устройство, 2 – трубка подвода электролита, 3 – электрод,
4 – эластичный экран, 5 – обрабатываемая деталь

К техническому результату, достигаемому с помощью предлагаемой системы отвода испарений газов с воздухом из зоны обработки оксидируемой поверхности, относится следующее:

- стабилизация кинетического слоя химических превращений при одновременном удалении газов из зоны оксидирования;
- обеспечение безопасности в результате отбора газов в пределах вакуумной полости, создаваемой эжектируемой струей воздуха вокруг электрода.

Для удаления выделяющихся газов применяют отсасывающее устройство, создающее пониженное давление p_{vac} и принимающее выделяющиеся газы вместе с воздухом, эжектируемым через щель с зазором δ между электродом и отсасывающей трубой, находящейся на высоте h от образца (Рисунок 2.2). Величина h должна предотвращать эжектирование воздухом электролита с обрабатываемой поверхности. В пределах этой высоты допускается деформирование эластичного экрана для обеспечения контакта с обрабатываемой поверхностью при оксидировании поверхностей, имеющих изменяющуюся кривизну.

Расход воздуха Q_B через щель δ между электролитом и отсасывающей трубой можно определить по формуле:

$$Q_B = \mu S \sqrt{\frac{\Delta p_{vac}}{\rho_B}}, \quad (2.1)$$

где $\mu=0,6$ – коэффициент расхода воздуха через щель; $S=\delta L$, L – длина щели; Δp_{vac} – вакуумметрическое давление, создаваемое отсасывающим устройством, $\rho_B=1,2$ кг/м³ – плотность воздуха.

Так как снаружи давление атмосферное, то $\Delta p_{щели} = \Delta p_{vac}$ – перепад давлений на щели.

Подставляя известные значения, определим [128]:

$$\delta = \frac{Q_B}{0,775L\sqrt{p_{vac}}} \quad (2.2)$$

Электролит под давлением P по трубке диаметром d через электрод подается на экспериментальный образец, проходя расстояние между срезом трубки и обрабатываемой поверхностью. Давление P должно быть достаточно для

преодоления расстояния до поверхности. Рассчитываемый расход электролита в рабочей зоне $G=0,24$ кг/с подтвержден опытным путем [127]. Учитывая изменяющуюся кривизну обрабатываемой поверхности, расстояние между электродом и обрабатываемой поверхностью образца (т. е. толщина эластичного экрана) в данном случае составляет 15 мм.

Предотвращение загазованности рабочего пространства обеспечивали, применив вентилирующее устройство, создающее разрежение $p=0,1$ атм. И отсасывающее газы из зоны оксидирования через щель.

Состав электролита: $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 12 г/л. Прокачивая электролит через электрод и поролон при напряжении и плотности тока 5 А/дм^2 , осуществляя перемещение устройства по поверхности плоского образца со скоростью $0,005 \text{ м/с}$, обеспечивая постоянную температуру в зоне обработки, формируем оксидный слой в заданном месте. Выделяющиеся газы полностью уходят в отсасывающее устройство. На экспериментальном образце из материала ВТ6 получено антикоррозионное покрытие, толщина слоя, измеренная с помощью прибора «Dualscope Prof», составляла не менее 1,2 мкм.

Таким образом, преимущества вышеприведенной схемы МДО таковы:

- электролит подается через пористый экран непосредственно к месту оксидирования поверхности детали;
- пористый экран, заполненный протекающим электролитом, удерживает большой объем электролита над обрабатываемой поверхностью;
- подбирая размер электрода, обеспечиваем покрытие необходимой площади поверхности детали;
- мобильность способа нанесения покрытия позволяет сформировать покрытие в конкретной необходимой области детали;
- возможность перенастройки оборудования в широком диапазоне режимных параметров с получением единичных результатов.

2.2 Описание образцов, технология и оборудование для формирования МДО-покрытия

2.2.1 Физико-химические свойства образцов

В качестве материалов основы (подложки) экспериментальных образцов выбраны 3 наиболее распространенных при проектировании в ракетно-космической отрасли алюминиевых сплава: АМг6.М (ОСТ 1 92000-90), 01570 (ТУ 1-809-615-2012), Д16.А.Т (ГОСТ 21631-76). Алюминиевые сплавы находились в состоянии поставки. Химический состав сплавов и физико-механические свойства приведены в Таблицах 2-4. Внешний вид представлен на Рисунках 2.3-2.5.

Таблица 2.

Химический состав образца из сплава АМг6.М. Вид поставки – плита
ГОСТ 17232-99

| Обозначение элемента | Al | Fe | Si | Mn | Ti | Cu | Be | Mg | Zn |
|----------------------|----------------|-----------|-----------|-------------|--------------|-----------|------------------|-------------|-----------|
| Процентный состав, % | 91,1– 93,68 | до 0,4 | до 0,4 | 0,5– 0,8 | 0,02– 0,1 | до 0,1 | 0,0002– 0,005 | 5,8– 6,8 | до 0,2 |

Таблица 3.

Химический состав образца из сплава 01570. Вид поставки – лист 3,0 мм,
термообработка – отжиг

| Обозначение элемента | Al | Fe | Si | Mn | Ti | Sc | Be | Mg | Zr |
|----------------------|-----------------|-----------|-----------|-------------|---------------|---------------|------------------|-------------|---------------|
| Процентный состав, % | 91,95– 94,17 | до 0,3 | до 0,2 | 0,2– 0,6 | 0,01– 0,05 | 0,17– 0,35 | 0,0002– 0,005 | 5,3– 6,3 | 0,05– 0,15 |

Таблица 4.

Химический состав образца из сплава Д16.А.Т. Вид поставки – плита
ГОСТ 17232-99, термообработка - закалка и старение

| Обозначение элемента | Al | Fe | Si | Mn | Ti | Cu | Cr | Mg | Zn |
|----------------------|---------------|-----------|-----------|-------------|---------|-------------|-----------|-------------|------------|
| Процентный состав, % | 90,9– 94,7 | до 0,5 | до 0,5 | 0,3– 0,9 | до 0,15 | 3,8– 4,9 | До 0,1 | 1,2– 1,8 | до 0,25 |



Рисунок 2.3.

Внешний вид образца из АМгб.М с МДО-покрытием



Рисунок 2.4.

Внешний вид образца из 01570 с МДО-покрытием



Рисунок 2.5.

Внешний вид образца из Д16.А.Т с МДО-покрытием

Физико-механические характеристики материалов основы (подложки) экспериментальных образцов с МДО-покрытием приведены в Таблице 5.

Таблица 5.

Физико-механические характеристики сплавов АМг6.М, Д16.А.Т, 01570

| Наименование характеристики | Значения | | |
|-----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | АМг6.М | Д16ТАТ | 01570 |
| Прочность на разрыв, МПа | 305–315 | 345-420 | 370..390 |
| Предел текучести, МПа | 145–155 | 245-275 | 245 |
| Относительное удлинение, % | 15 | 20 | 15 |
| Твёрдость, НВ | 65 | 105 | 77,6 |
| Модуль упругости, МПа | $0,71 \cdot 10^5$ | $0,72 \cdot 10^5$ | $0,70 \cdot 10^5$ |

2.2.2. Выбор применяемого электролита

Анализ исследований [74, 129-133] позволяет сделать вывод о том, что состав, концентрация и температура электролита, применяемого для формирования МДО-покрытия, имеют существенное влияние на фазовый состав МДО-покрытий и, как следствие, на их свойства и морфологию.

Общие характеристики электролитов, применяемых для получения надежных МДО-покрытий [134, 135]:

- электролиты, содержащие растворы кислот и щелочей, при использовании которых упрочненный слой создается за счет окисления металла;
- электролиты на основе жидкого стекла, при использовании которых упрочненный слой создается за счет анионов в электролите;
- смешанные растворы первой и второй группы, при использовании которых упрочненный слой создается за счет анионов в электролите и окисления металла;
- растворы, содержащие мелкодисперсные частицы.

Составы наиболее приемлемых для целей работы электролитов при формировании МДО-покрытий сведены в Таблицу 6.

Состав электролитов и эксплуатационные характеристики получаемых
МДО-покрытий [136]

| Состав электролита, г/л Н ₂ О | Толщина покрытия, мкм | Назначение покрытия |
|---|-----------------------|---|
| 1. Гидроксид калия, 2..8 | 50..100 | Износостойкость и антикоррозионная защита |
| 2. Натриевое жидкое стекло, 180..200, гидроксид калия, 75..84. | 300..500 | Устойчивость к температурным воздействиям |
| 3. Натриевое жидкое стекло, 20..60. | 100..150 | Износостойкость и антикоррозионная защита |
| 4. Гидроксид натрия, 15..30 | 25..200 | Защита от термического воздействия |
| 5. Натриевое жидкое стекло, 80..120, оксид алюминия, 10..20. | | |
| 6. Гидроксид калия, 2..3, натриевое жидкое стекло, 8..10, пероксид водорода, 2,5..10. | 150..200 | Износостойкость |
| 7. Аллюминат натрия, 25..50. | 200..300 | Антикоррозионная защита и устойчивость к температурным воздействиям |
| 8. Натрий фосфорно-молибденовокислый, 10..100. | 5..20 | Антикоррозионная защита |
| 9. Концентрированная серная кислота | 15..50 | Повышение прочности, антикоррозионная защита |

При объединении электролитов различных групп можно получить более качественные МДО-покрытия. Заметим также, что одним из часто используемых

комбинированных растворов является раствор на основе «КОН- Na_2SiO_3 ». В данном комбинированном электролите составляющая КОН улучшает травление материала основы, посредством чего упрочненный слой формируется в глубину оксидируемой детали. В то же время применение жидкого стекла формирует покрытие с повышенной прочностью за счет компонентов электролита. Кроме того, данный компонент электролита позволяет получить искомую толщину МДО-покрытия.

Были так же приняты во внимание ранее выполненные эксперименты по физике процесса МДО в комбинированных электролитах с использованием КОН и NaAlO_2 и добавлением в электролит жидкого стекла, где было установлено, что при анодно-катодном режиме оксидирования формирование рабочего слоя с высокими прочностными характеристиками происходит не сразу, а в течение определенного времени [137].

Основные параметры формирования МДО-покрытия на экспериментальных образцах приведены ниже.

Состав электролита:

КОН – 2 г/л;

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

Электрические параметры режима:

$I_k/I_a=1,0\dots 1,1$;

$J=10,5\dots 11,0$ А/дм²,

где

I_k – значение катодной составляющей тока,

I_a – значение анодной составляющей тока,

J – плотность тока.

Время обработки и толщина покрытия на экспериментальных образцах приведены в Таблице 7.

Время обработки и полученная толщина покрытия на экспериментальных образцах

| 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 |

Исходя из вышеизложенного, метод МДО позволяет получать на экспериментальных образцах из выбранных алюминиевых сплавов покрытия в довольно широком диапазоне толщин. Важно установить зависимость качества получаемых защитных покрытий от техники и режимов оксидирования, толщины покрытий, а также от устойчивости к нагрузкам экспериментального образца с МДО-покрытием.

2.2.3. Техника эксперимента при получении необходимых МДО-покрытий

Покрытия выполнялись с использованием оборудования и технологии МАИ. Последовательность технологических операций при формировании МДО-покрытий приведена на схеме (Рисунок 2.6).



Рисунок 2.6.

Схема технологической последовательности при формировании МДО-покрытий

Установка для формирования МДО-покрытий в общем виде состояла из гальванической ванны, технологического источника тока, системы прокачки, системы охлаждения, системы перемешивания электролита, вытяжной вентиляции (Рисунки 2.7-2.10). Ванна снаружи закрыта охлаждающей рубашкой с водой, выполняющей роль теплообменника для охлаждения электролита. Перемешивание электролита производилось при помощи барботажа (продувки воздуха через электролит).

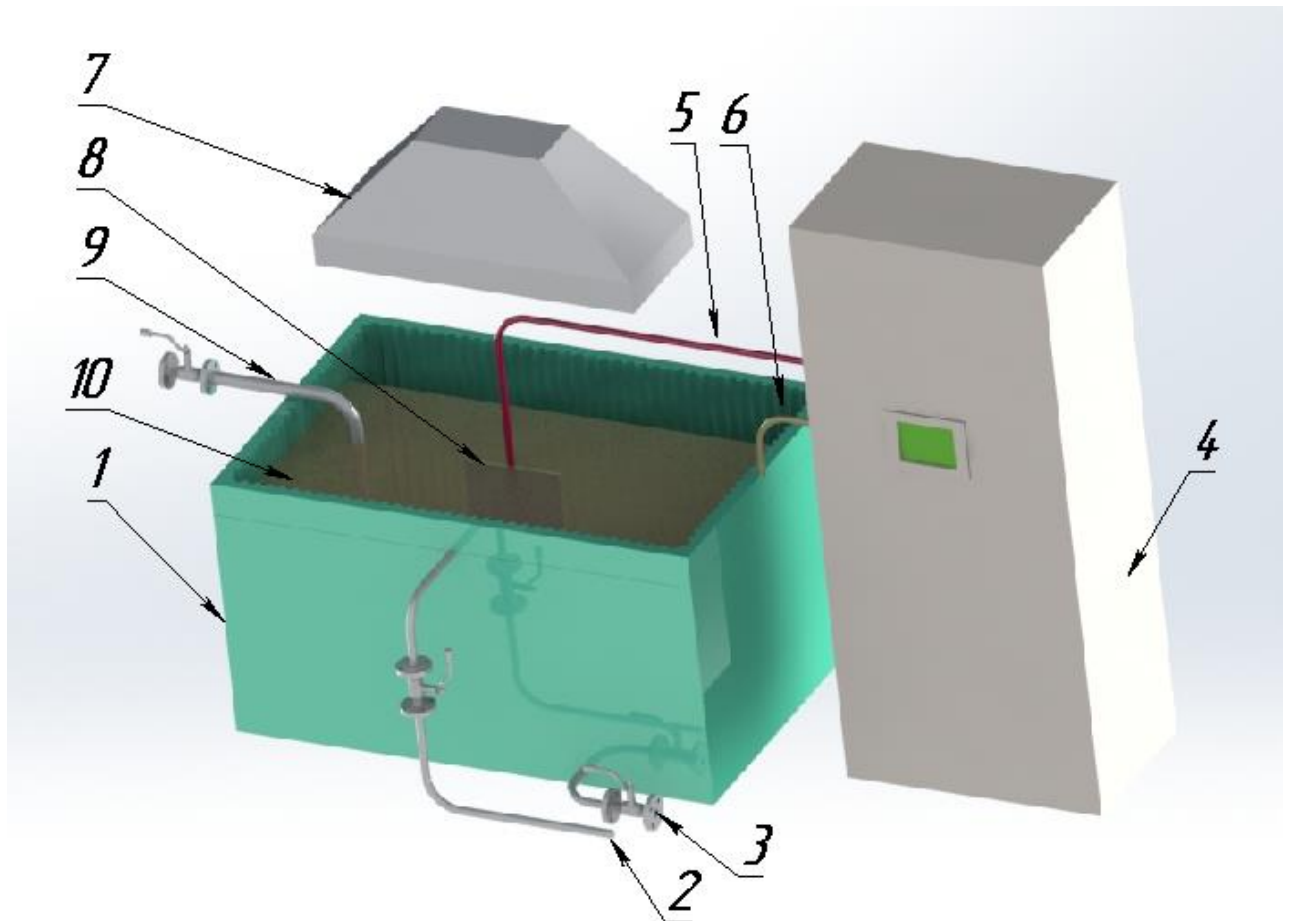


Рисунок 2.7.

Установка для микродугового оксидирования. 1 - гальваническая ванна с рубашкой охлаждения; 2 - подвод воды; 3 - отвод воды; 4 - технологический источник тока; 5, 6 - токопроводы; 7 - вытяжная вентиляция; 8 - деталь; 9 - барботаж; 10 - электролит

Обеспечение требуемых режимов тока с необходимыми параметрами реализовано применением преобразователя тока. В зависимости от режима формирования МДО-покрытия применяли известные технологические преобразователи тока со следующими видами преобразования в воздействующий ток:

- переменный в постоянный;
- переменный в импульсный униполярный;
- переменный в переменный;
- переменный в импульсный реверсивный (асимметричный).

На Рисунке 2.8 приведена одна из использованных схем, которая позволяет обеспечить независимое формирование анодного и катодного сигнала поляризирующего напряжения и регулировать I_K/I_A . Схема включает в себя две ветви, участвующие в формировании выходного импульса: анодную ($C1$, $VD1$, $VS1$) и катодную ($C2$, $VD2$, $VS2$). Средние величины составляющих выходного тока могут регулироваться конденсаторами $C1$ (анодная составляющая) и $C2$ (катодная составляющая), а также углами управления тиристоров $VS1$ (анодная составляющая), $VS2$ (катодная составляющая). Когда создается анодный выходной импульс, конденсатор катодной ветви заряжается до амплитуды напряжения сети через диод $VD2$. Когда создается катодный импульс, конденсатор анодной ветви заряжается до амплитуды напряжения сети через диод $VD1$. Выбор данной схемы обоснован тем, что в преобразователях тока такого типа возможна реализация амплитудного и импульсно-фазового управления параметрами выходных импульсов [130].

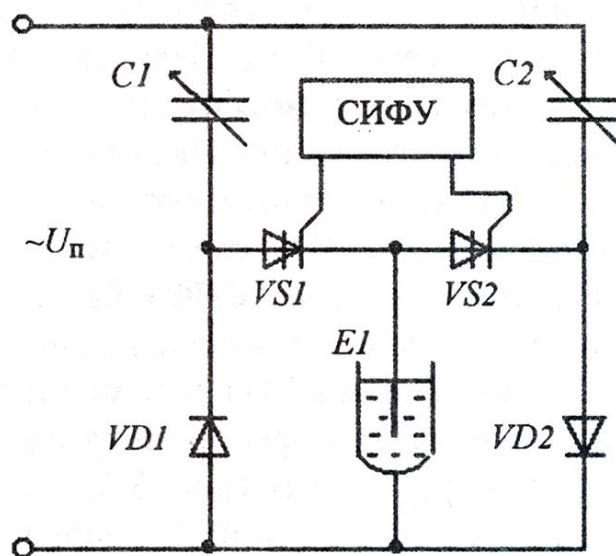


Рисунок 2.8.

Технологический преобразователь тока

Внешний вид гальванической ванны с рубашкой охлаждения и технологического источника тока приведен на Рисунках 2.9 и 2.10.



Рисунок 2.9.

Гальваническая ванна с рубашкой охлаждения



Рисунок 2.10.

Технологический источник тока с системой управления

2.3. Разработка методик исследования экспериментальных образцов

2.3.1. Методика определения толщины МДО-покрытий

Для измерения толщины МДО-покрытия был применен вихретоковый толщиномер MiniTest 2100 ElektroPhysik. При помощи этого толщиномера можно

измерять толщины немагнитных покрытий на магнитном и немагнитном основаниях. В настройках толщиномера задается материал основы (подложки) и тип измеряемого покрытия. Для магнитных оснований необходимо задавать метод измерения магнитной индукции, для немагнитных оснований – вихретоковый.

Для образцов из сплавов алюминия необходимо применять метод вихревых токов. Принцип работы метода состоит в том, катушкой индуктивности формируется переменное электромагнитное поле, в которое помещается деталь. На поверхности детали возникают вихревые токи. Электромагнитное поле, создаваемое вихревыми токами, при взаимодействии с полем катушки индуктивности приводит к изменению её полного сопротивления. Изменение сопротивления катушки индуктивности преобразуется аппаратно-программной частью толщиномера в сигнал изменения абсолютных значений параметров объекта.

Толщиномер укомплектован металлическим наконечником для возможности проведения измерений на криволинейных поверхностях, а также позволяет выполнить измерения в широком угловом диапазоне.

2.3.2. Методика определения параметров износа поверхности с МДО-покрытием

Для определения параметров износа поверхности с МДО-покрытием использован конфокальный лазерный сканирующий микроскоп Keyence серии VK-X100. Данный микроскоп сочетает в себе преимущества сканирующего электронного микроскопа и профилометра. Основным назначением микроскопа является измерение профиля и шероховатости поверхности. Конфокальный микроскоп укомплектован лазером для освещения исследуемого образца (во флуоресцентных микроскопах используются ксеноновые лампы). Освещение лазером имеет ряд преимуществ, среди которых меньшее отклонение от

параллельности излучаемого света, монохромность изображения, стабильность системы освещения и точность фокусировки микроскопа. Получаемое финальное изображение формируется при помощи комплексной работы лазера, фотоэлектронного умножителя, сканирующей аппаратуры и аппаратно-программной системы. Для отсеивания фоновых засветок установлена специальная диафрагма, которая повышает разрешение, четкость и контрастность изображения. Одним из преимуществ является то, что не требуется предварительной подготовки образца. Основные характеристики микроскопа приведены в таблице 8.

Таблица 8.

Основные характеристики микроскопа Keyence

| Параметр | Значение |
|-------------------------|--|
| Максимальное увеличение | до 19200х |
| Поле зрения | от 16 мкм до 5400 мкм |
| Оптическая схема | Конфокальная оптическая система с пинхолом |

Выводы по Главе 2

1. Рассмотрена технология локального формирования МДО-покрытия, в качестве перспективного метода нанесения защитных покрытий. Описана схема работы и подобраны режимы для экспериментальной установки.
2. В качестве образцов контактных пар для проведения экспериментальной отработки устойчивости МДО-покрытия к фреттингу и микроудару подобраны: сферические упоры из стали 20Х13, пластины из алюминиевых сплавов АМг6.М, 01570, Д16.А.Т.
3. Проанализированы применяемые для МДО-процесса электролиты, а также получаемые с их помощью эксплуатационные характеристики. Для нанесения МДО-покрытия на экспериментальные образцы подобран электрический режим $I_k/I_a=1,0..1,1$; $J=10,5/11,0$ А/дм² и выбран электролит КОН + Na₂SiO₃·12 Н₂О.
4. Описана технология получения МДО-покрытия на экспериментальных образцах, применяемое оборудование и средства контроля.

ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА АНТИФРЕТТИНГОВЫЕ СВОЙСТВА МДО-ПОКРЫТИЙ

3.1. О модели физических процессов, происходящих в контактных парах при виброударных и других видах внешних воздействий

Модель – условный образ какого-либо объекта или процесса. Она служит, прежде всего, для выражения отношения между знаниями о процессах или объектах и самими объектами. В нашем случае, для прогнозирования устойчивости МДО-покрытий к воздействию внешних факторов применимы математические методы, включая и компьютерное моделирование. То есть должна быть проведена формализация процесса путем математического описания.

Под математическим моделированием понимают процесс установления соответствия реального фактического процесса его математической модели. В настоящее время более или менее развитый теоретический аппарат математического моделирования, позволяющий описать основную часть практически значимой действительности, разработан только для ряда технических и физических уровней сложности [138]. Базой более сложных уровней служат менее формализованные науки, например, биологические, экономические и д. р. Для практических целей существуют базовые модели, которые являются максимально упрощенными. На их базе и создают сложные частные модели реальных систем.

Примером моделирования поведения сложных систем в условиях воздействия внешних факторов являются результаты исследований, описанные в [139]. Для сложных систем с учетом их структуры предложены имитационные и оптимизационные модели [140].

Математическое моделирование взаимных воздействий поверхностей арретированных деталей узла раскрытия КА с нанесенными покрытиями является нетривиальной задачей и усложняется тем фактом, что частота, усилие и характер взаимного воздействия элементов изменяются во времени. В данном случае, для исследования физико-механических процессов целесообразно разработать и изготовить экспериментальную модель имитирующую взаимные воздействия арретированных деталей и позволяющую создавать нагрузки, имитирующие выведение КА РН.

Критерием выбора необходимого сплава и параметров покрытия является снижение адгезии. Значение полной энергии адгезии ($W_{адг}^*$), характеризующая энергию, которая затрачивается на разрыв адгезионного контакта площадью S , рассчитывается по формуле [141]:

$$W_{адг}^* = W_{адг} S_{адг}, \quad (3.9)$$

где

$W_{адг}$ – энергия, которая затрачивается на обратимый изотермический разрыв адгезионного контакта единичной площади,

$S_{адг}$ – площадь адгезионного контакта.

Очевидно, что снижение площади адгезии приводит к уменьшению работы по преодолению адгезии контактирующих пар узла раскрытия космического аппарата. В свою очередь, площадь адгезионного контакта будет минимальна в следующих случаях:

- при минимальном разрушении покрытия,
- при разрушении покрытия и вдавливания его частиц в материал основы, на которой оно было нанесено.

Для оценки факторов, влияющих на площадь адгезионного контакта $S_{адг}$ при разрушении МДО-покрытия, сделаем допущение, что всё разрушенное покрытие на площади воздействия упора на площадку $S_{нокр}$ вдавливается в образовавшуюся деформированную поверхность контакта $S_{конт}$ без выброса из зоны контакта (Рисунок 3.1).

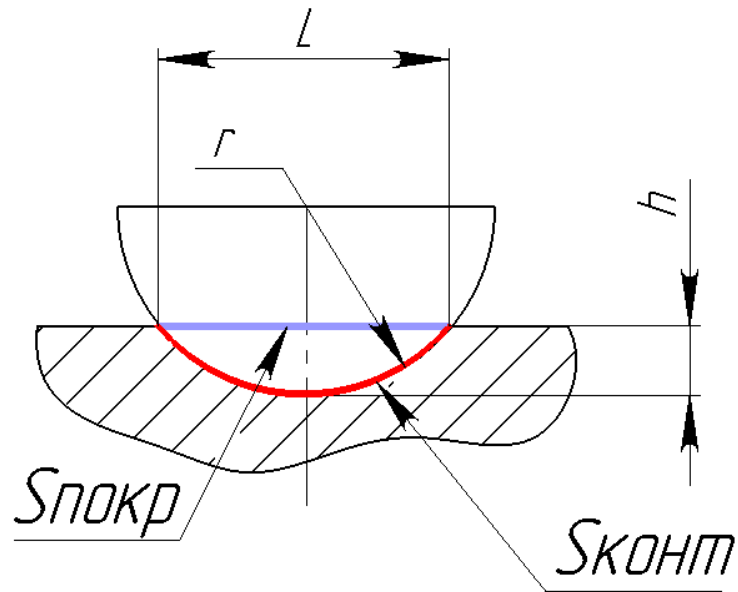


Рисунок 3.1. Геометрическое представление контакта поверхностей упора и площадки

Тогда площадь адгезионного контакта равна:

$$S_{\text{адг}} = S_{\text{конт}} - S_{\text{покр}} \quad (3.10)$$

$$S_{\text{покр}} = \frac{\pi L^2}{4}, \quad (3.11)$$

где L – хорда окружности радиусом r (радиус сферы упора).

Площадь поверхности сегмента (поверхность контакта) $S_{\text{конт}}$ равна:

$$S_{\text{конт}} = 2\pi r h, \quad (3.12)$$

где

r – радиус сферы упора;

h – глубина внедрения упора в пластину.

Параметры L , r , h связаны отношением:

$$r = \frac{L^2/4 + h^2}{2h} \quad (3.13)$$

Откуда площадь поверхности контакта будет равна:

$$S_{\text{конт}} = \pi (L^2/4 + h^2) \quad (3.14)$$

Подставив значение площадей покрытия и площадей контакта в выражение (3.10) получаем:

$$S_{\text{адг}} = \pi (L^2/4 + h^2) - \frac{\pi L^2}{4} = \pi h^2 \quad (3.15)$$

Следовательно, для снижения адгезии контактирующих поверхностей, важно максимально снизить глубину износа поверхности площадки, на которую воздействует упор.

Выдвинем гипотезу, что процесс взаимного воздействия деталей контактной пары, при нагрузках аналогичных режиму выведения РН, состоит из трех последовательных стадий:

Фреттинг-износ → микроударное воздействие → микроударное воздействие + трение.

На начальном этапе вибрационных воздействий рассматриваемые поверхности деталей находятся в контакте со взаимным усилием. Взаимное влияние контактирующих деталей приводит к эффекту фреттинг-износа. Так как отсутствуют перемещения деталей относительно друг друга в тангенциальном направлении, удара не происходит. По мере износа сопрягаемых поверхностей деталей между ними формируется микрозазор, который приводит к появлению ударной составляющей. Ввиду незначительной энергии удара взаимное воздействие контактирующих элементов описывается законом Гука:

$$F=k \cdot \Delta l, \quad (3.16)$$

где

F – сила воздействия сферического упора на площадку;

k – коэффициент упругости основы из алюминиевого сплава с нанесенным МДО-покрытием,

Δl – величина деформации основы.

В процессе износа происходит рост ударной составляющей и при достижении воздействующей энергии определенной величины происходит хрупкое разрушение МДО-покрытия. При разрушении МДО-покрытия воздействие упора на площадку описываются с помощью теории Герца для случая контакта «шар-поверхность».

Область контакта упора и площадки определяется выражением:

$$a_k = \sqrt{Rd}, \quad (3.17)$$

где

R – радиус сферы упора;

d – глубина проникновения сферы упора в материал площадки

Сила, необходимая для данного взаимодействия, равна:

$$F = \frac{4}{3} E^* R^{1/2} d^{3/2}, \quad (3.18)$$

где

E - модуль Юнга;

R – радиус сферы упора;

d – глубина проникновения сферы упора в материал площадки.

При микроударном воздействии применимо описание процесса разрушения керамики, предложенное Галановым Б. А. [142], который выделяет три области при воздействии на керамический материал индентором (Рисунок 3.2): область, состоящая из уплотнённого разрушенного материала области дилатации (ядро) при сжатии; область дилатации, созданная радиальными трещинами; упругая область, состоящая из разрушенного и сильно сжатого материала.

В работе [143] приведена зависимость твердости от размера отпечатка индентора:

$$HM = \frac{P}{\pi a^2}, \quad (3.19)$$

где

HM – твердость индентруемого материала по Мейеру;

P – нагрузка, при которой область контакта индентора совпадает с границей ядра на поверхности образца (Рисунок 3.37);

a – радиус ядра.

Для случая циклического воздействия упора, являющегося индентором, на экспериментальный образец (пластину) с МДО-покрытием сила P будет являться результирующей суммой воздействий на образец P_{Σ} .

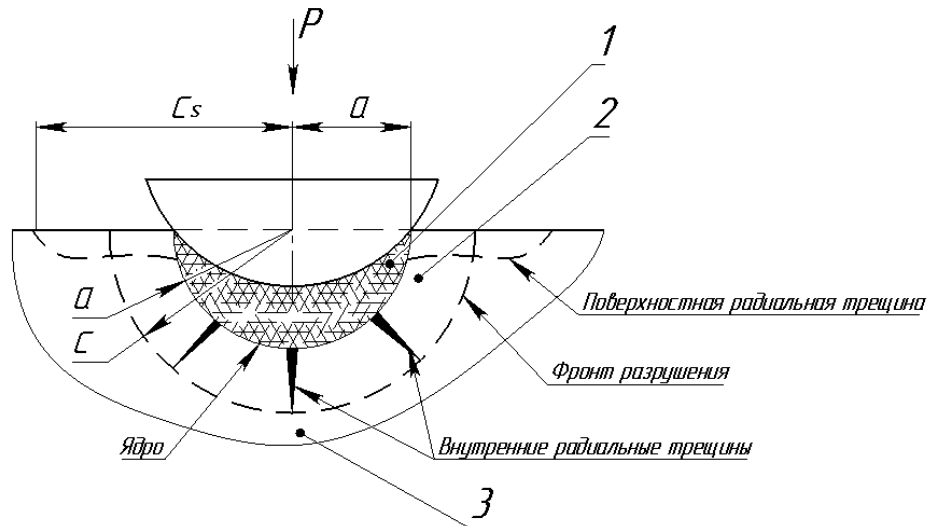


Рисунок 3.2.

Схема взаимодействия сферического упора с керамическим покрытием.

1 - область из уплотнённого фрагментированного материала области дилатации (ядро с радиусом a) при её разрушении при сжатии; 2 - область дилатации, созданная радиальными трещинами (где c – длина радиальной трещины); 3 - упругая область, состоящая из сильно сжатого материала. C_s – длина поверхностной трещины

Согласно [143] твердость НМ рассматривается как удельная работа внедрения отнесенная к единице внутреннего объёма и включает в себя работу, затраченную на упругое деформирование, разрушение и утрамбовывание разрушенного материала, а также учитывает пористость материала. Связь твердости НМ с пористостью и контактной прочностью при сжатии описывается следующими зависимостями:

$$HM = \frac{2(1-\theta^*)^{3/2}}{3\sqrt{\theta^*}} Y; \quad (3.20)$$

$$\theta^* = 1 - (1 - \theta_0)\exp(-e_c); \quad (3.21)$$

$$e_c = \frac{HM}{E} \left[1 - (1 - \gamma) \sqrt{\frac{2\sigma_f}{HM}} \right], \quad (3.22)$$

где

Y - контактная прочность покрытия;

θ_0 - исходная пористость образца;

θ^* - пористость раздробленного материала на границе ядра;

e_c - объемная деформация на границе ядра;

E - модуль Юнга;

γ - коэффициент Пуассона;

σ_f - величина напряжений растяжения в вершинах поверхностных радиальных трещин.

Для описания случая микроударного воздействия сферического упора на образец с МДО будем считать, что весь материал покрытия после ударного разрушения вдавливаются в более мягкий материал основы (подложки), без выброса наружу продуктов выкрашивания. Тогда критерием потери работоспособности покрытия для данного случая будет являться:

$$h=N, \quad (3.23)$$

где

h – глубина износа экспериментального образца;

N – толщина МДО-покрытия.

При величине $h \geq N$, вклад покрытия в устойчивость к износу начинает снижаться, а ударное воздействие от упора будет восприниматься только материалом основы. Анализируя Рисунок 3.37, приходим к выводу, что чем тверже материал основы, на которую нанесено покрытие, тем сложнее происходит внедрение продуктов разрушения МДО-покрытия в материал основы. Следовательно, формируется более плотное ядро (Рисунок 3.37), препятствующее износу.

Найдем геометрическую зависимость вертикальной составляющей износа от геометрии упора. Для этого преобразуем Рисунок 3.2 в схему, представленную на Рисунке 3.3.

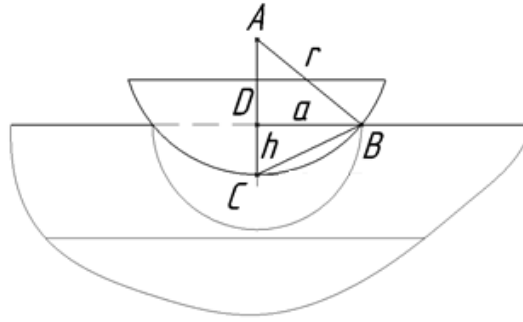


Рисунок 3.3. Геометрия взаимодействия сферического упора с керамическим покрытием

Применив теорему Пифагора, получим равенство:

$$a^2 = r^2 - (r - h)^2, \quad (3.24)$$

где

a – радиус ядра;

r – радиус сферического упора;

h – глубина износа.

Откуда получаем уравнение:

$$h^2 - 2rh + a^2 = 0 \quad (3.25)$$

Найдем корни данного квадратного уравнения:

$$h = \frac{2r \pm \sqrt{(-2r)^2 - 4a^2}}{2} \quad (3.26)$$

Для варианта $r > h$ получаем корень уравнения:

$$h = r - \sqrt{r^2 - a^2} \quad (3.27)$$

Подставляя в полученное выражение значение a^2 (3.19), получаем вклад радиальных трещин в износ образца:

$$h = r - \sqrt{r^2 - \frac{P_{\Sigma}}{HM\pi}} \quad (3.28)$$

С учетом зависимостей 3.20, 3.21 выражение 3.28 будет иметь вид:

$$h = r - \sqrt{r^2 - \frac{3YP_{\Sigma}\sqrt{1-(1-\theta_0)\exp(-e_c)}}{2\pi \cdot (1-\theta_0)\exp(-e_c)^{3/2}}} \quad (3.29)$$

Анализируя механизм образования трещин при внедрении индентора в керамическое покрытие, можно выделить три типа трещин [144]: радиальные, медианные и боковые трещины (Рисунок 3.4).

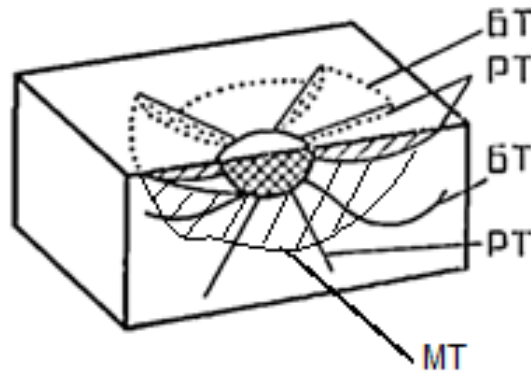


Рисунок 3.4.

Схема расположения трещин, образующихся после внедрения шара. РТ, МТ, БТ – радиальные, медианные и боковые трещины соответственно [144]

При воздействии сферического упора на экспериментальный образец с МДО-покрытием в первую очередь происходит образование радиальных трещин, которые развиваются от границ кратера отпечатка. При последующем увеличении нагрузки в процессе перехода к циклическому микроударному воздействию средняя длина радиальных трещин возрастает и появляются медианные трещины, имеющие дискообразную форму. В процессе роста медианные трещины сливаются с радиальными. Далее, между радиальными трещинами появляются подповерхностные боковые трещины, которые распространяются параллельно поверхности. При разгрузке все три типа трещин развиваются и появляются дополнительные трещины [144].

Анализируя схемы трещинообразования (Рисунок 3.5) приходим к выводу, что с ростом толщины покрытия значительный вклад в износ вносят медианные трещины, переходящие в боковые, и приводят к сколам. Продукты разрушения покрытия в таком случае являются абразивом, увеличивающим износ испытываемого образца, что подтверждает ранее выдвинутую гипотезу о наличии третьей стадии износа - «микроударное воздействие+трение».

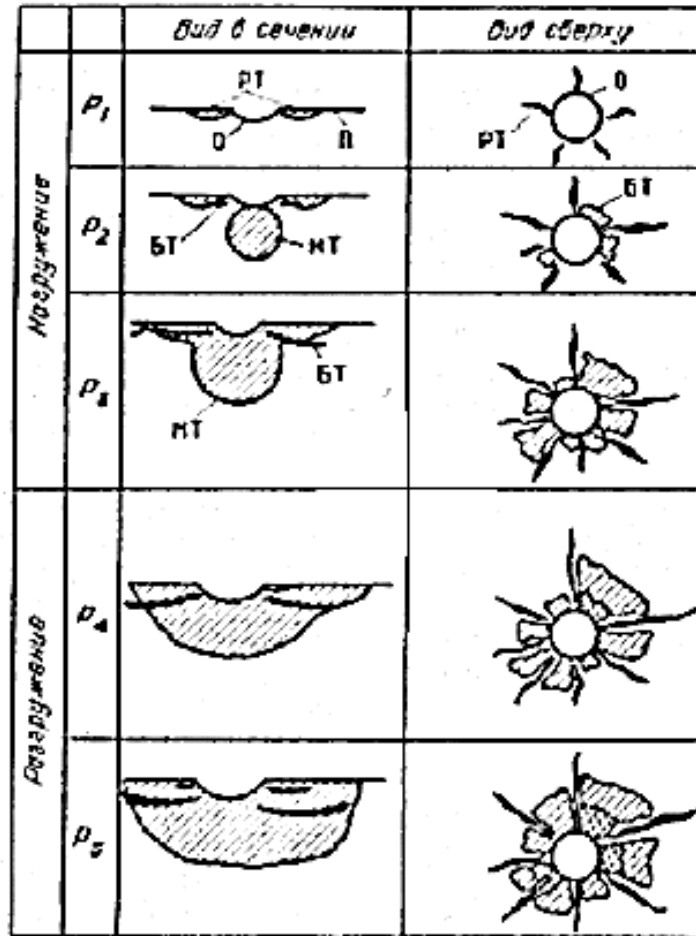


Рисунок 3.5.

Схема процесса трещинообразования при внедрении сферического тела: П – поверхность материала, О – отпечаток, РТ – радиальные трещины, МТ – медианные трещины, БТ – боковые трещины [144]

Одной из целей последующей экспериментальной части работы является подтверждение гипотезы о стадиях износа образцов и определение экстремальных точек перехода между стадиями износа.

3.2. Некоторые особенности проявления воздействующих факторов на контактирующие поверхности элементов раскрытия КА

При выведении КА на околоземную орбиту на него действуют вибрационные воздействия и ударные нагрузки. Степень их влияния на рабочие поверхности пар трения зависит от зазоров в парах, которые, в свою очередь, зависят от температурного диапазона эксплуатируемого изделия, физических

характеристик материалов сопрягаемых деталей, класса точности сопряжения. На этапе выведения на расчетную орбиту вибрации могут вызвать интенсивное разрушение поверхностей контактирующих деталей. Данное явление, как отмечено выше, называется фреттингом. Первопричиной фреттинга является фрикционное взаимодействие соприкасающихся номинально неподвижных поверхностей, происходящее в результате их относительных микросмещений в условиях вибраций. Вибрационные нагрузки способствуют интенсивному росту упругопластических деформаций, в несколько раз превышающий деформации, развивающиеся при трении без вибрации, и ускоренному усталостному разрушению поверхностных слоёв материалов. При отсутствии вибраций деформация достигает соизмеримой со статической нагрузкой без вибрации величины лишь при увеличении нагрузки в несколько десятков раз. Из всех видов динамических нагрузок, действующих на изделие, как было подтверждено [24], вибрация является наиболее опасным. При этом наиболее подвержены фреттинг-износу детали механизмов, рабочие поверхности которых при запуске КА на целевую орбиту находятся в статическом контакте.

В данной работе, рассматриваются конструкции механизмов КА в которых используются сплавы лёгких металлов. Для исключения случаев адгезии на контактирующие поверхности деталей принято наносить защитные покрытия. При разрушении защитных покрытий и длительном нахождении в вакууме может возникнуть «холодная сварка», поэтому особое внимание нами уделено подбору защитных покрытий на контактных парах, способных сохранять свои свойства при транспортировании КА на заданную орбиту.

Вопросы и проблемы обеспечения стойкости различных покрытий в условиях виброударных нагрузок, как мы отмечали выше, решаются довольно широким кругом специалистов и исследователей в различных сферах [121-126], прежде всего попытками смоделировать наблюдаемые при этом физические процессы.

3.2. Методика моделирования воздействий на контактную пару

Для моделирования воздействий на контактирующую пару, создаваемых при выведении ракетой-носителем, разработано приспособление, закрепляющееся на вибростенде (Рисунок 3.6). Оно представляет собой упрощенную модель арретированного механизма раскрытия и включает в себя: конструктивный элемент (консольно закрепленную балку), целевую нагрузку (массовый имитатор) и элементы распора (сферический упор и площадку).

Анализ возникающих в процессе экспериментов перемещений позволяет предположить, что при наличии вибронагружения по направлению осей «X» и «Y», поверхности соприкасающихся элементов, находящихся во взаимно прижатом контакте, функционируют в условиях трения и фреттинга. В случае вибронагружения по направлению оси «Z» взаимодействие идет в условиях комбинации фреттинга и микроудара (имеет место разрыв контакта поверхностей с последующим его восстановлением за счёт упругости балки), что является наиболее худшим режимом взаимодействия.

В приспособлении реализовано перемещение массового имитатора 1 совместно с консольной балкой 4 на различное расстояние от точки заневоливания балки (заделки) вдоль оси «X», что позволяет изменять собственную частоту приспособления.

Для обеспечения необходимой собственной частоты колебаний массового имитатора размеры сечения и длина l_{σ} балки приспособления определяются из условия равенства податливости балки и податливости моделируемого узла космического аппарата:

$$\frac{l_{\sigma}}{E_{\sigma} \cdot I_{\sigma}} = \frac{l_m}{E_m \cdot I_m}, \quad (3.30)$$

где l_{σ} – линейная длина балки, м;

l_m – длина моделируемого консольного элемента, м;

E_{σ} – модуль упругости материала балки, МПа;

E_m – модуль упругости материала моделируемого консольного элемента, МПа;

I_b – геометрический момент инерции сечения балки, м⁴;

I_m – геометрический момент инерции сечения моделируемого консольного элемента, м⁴.

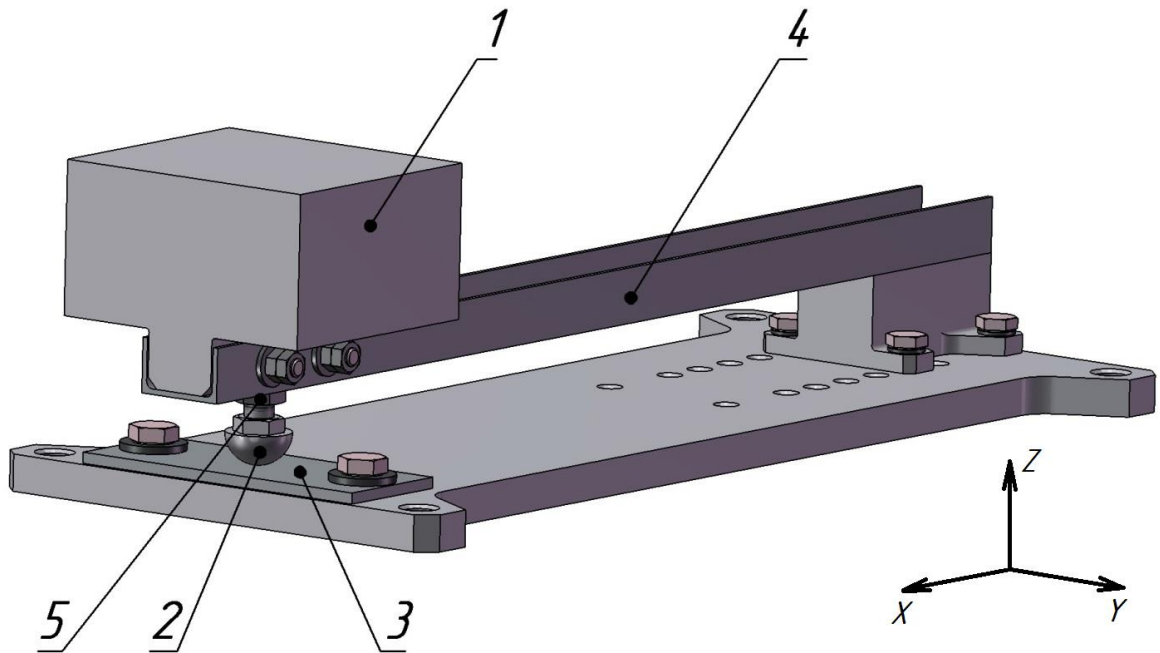


Рисунок 3.6.

Приспособление для моделирования нагрузок, возникающих при выведении ракетой-носителем, на взаимно контактирующие поверхности:

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

Эскизы сферического упора и экспериментального образца пластины с МДО-покрытием показаны на Рисунках 3.7, 3.8.

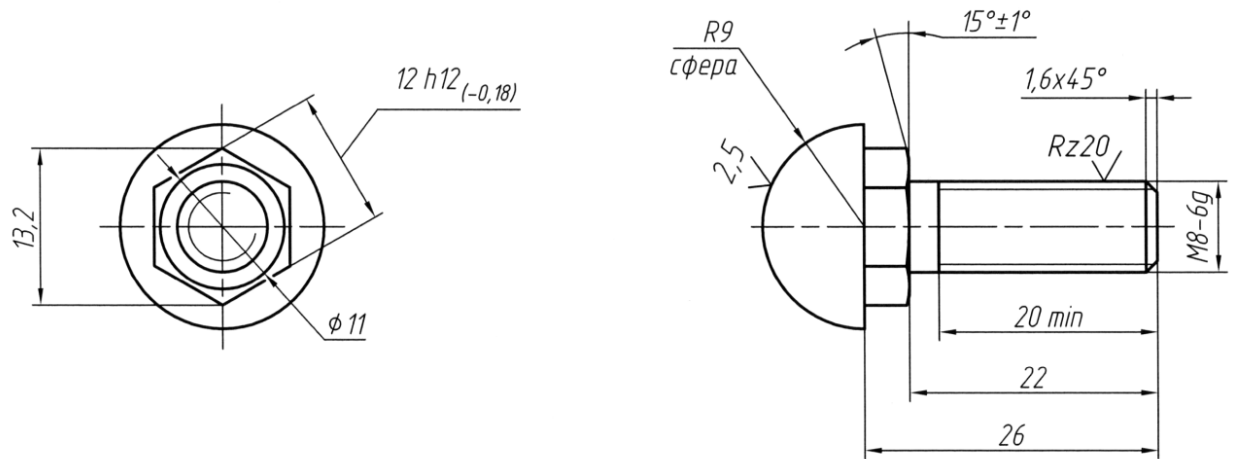


Рисунок 3.7.

Эскиз сферического упора для проведения эксперимента

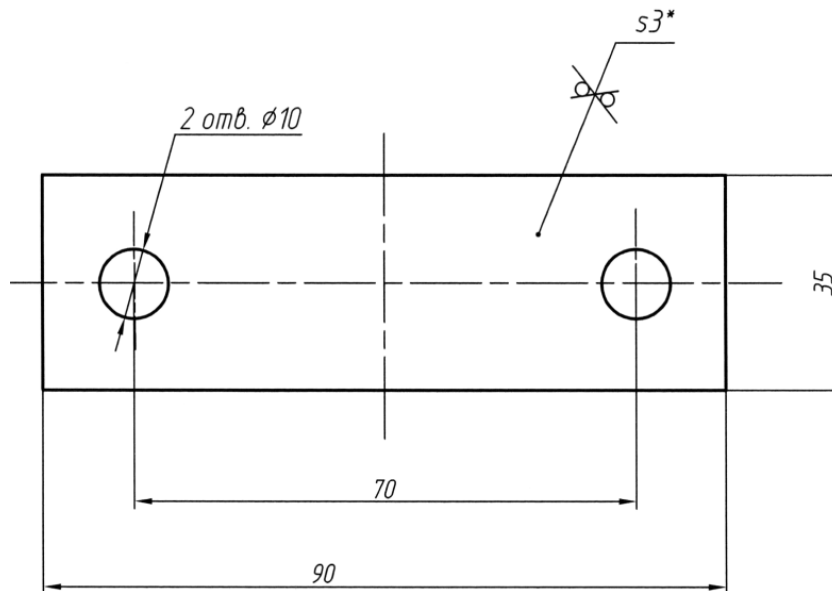


Рисунок 3.8.

Эскиз экспериментального образца пластины с МДО-покрытием

Для обеспечения надёжного удержания целевой нагрузки механизмом раскрытия на этапе выведения создается предварительное натяжение на элементах распора (во взаимно контактирующей паре). Для этого, после касания сферического упора 2 и площадки 3, упор докручивается с определённым моментом для повышения жесткости конструкции и избежания ударов в стыке с площадкой.

Для анализа частотных характеристик приспособления и определения предварительного усилия на упоре была разработана расчетная модель в программе ANSYS. Исходя из анализа жёсткости раскрываемых конструкций КА в транспортном положении, параметры приспособления заданы следующими: эквивалентная масса имитатора полезной нагрузки (груза) выбрана 2 кг, расстояние от центра масс имитатора нагрузки до заделки консольной балки (вылет балки) – 0,198 м, в свободном положении минимальная крутильная частота собственных колебаний – 8,7 Гц, минимальная собственная частота консольных изгибных колебаний в направлении распора – 12,8 Гц (Рисунки 3.9 и 3.10). В состоянии распора жесткость конструкции меняется. Если рассматривать наличие распора в схеме как однокомпонентную силовую связь, то из спектра частот исключается консольная изгибная частота. В таком состоянии энергетика колебаний сосредоточена на частотах 8,8 Гц – крутильная (Рисунок 3.11), 46,5 Гц изгиб с кручением (Рисунок 3.12) и изгибная 122 Гц (Рисунок 3.13). Формы колебаний на частотах до 1000 Гц приведены на Рисунках 3.14, 3.15. На частоте 1832 Гц колебания совпадают с направлением нагружения и соответствуют продольным колебаниям упора (Рисунок 3.16).

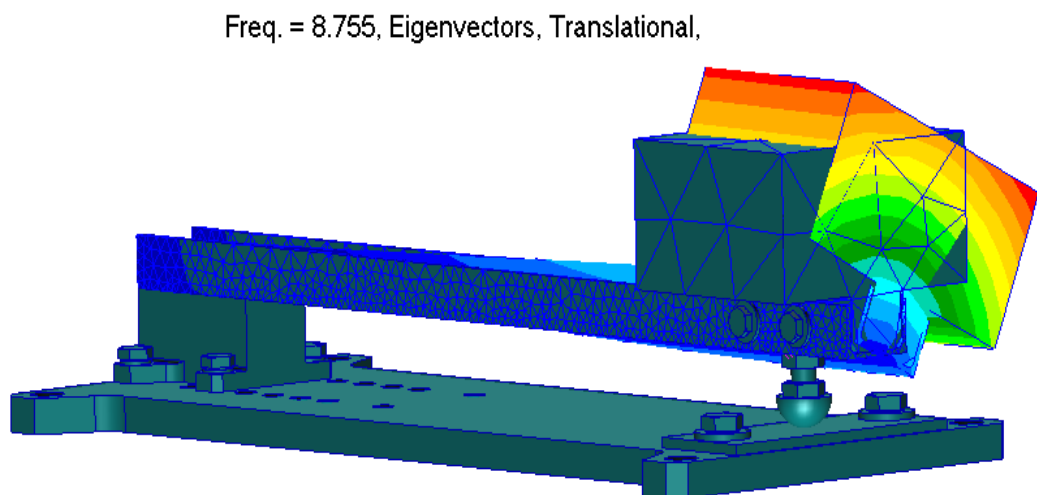


Рисунок 3.9.

Перемещения при минимальной частоте собственных колебаний приспособления, крутильная составляющая

Freq. = 12.832, Eigenvectors, Translational,

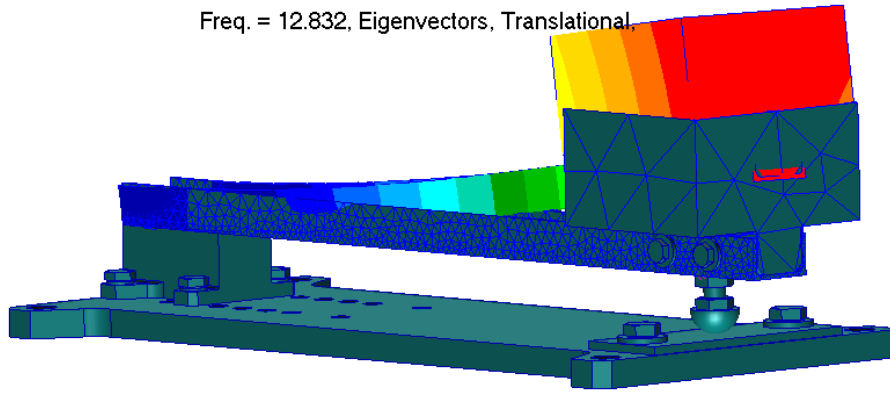


Рисунок 3.10.

Перемещения при минимальной собственной частоте консольных изгибных колебаний приспособления в направлении распора

Freq. = 8.7659, Eigenvectors, Translational,

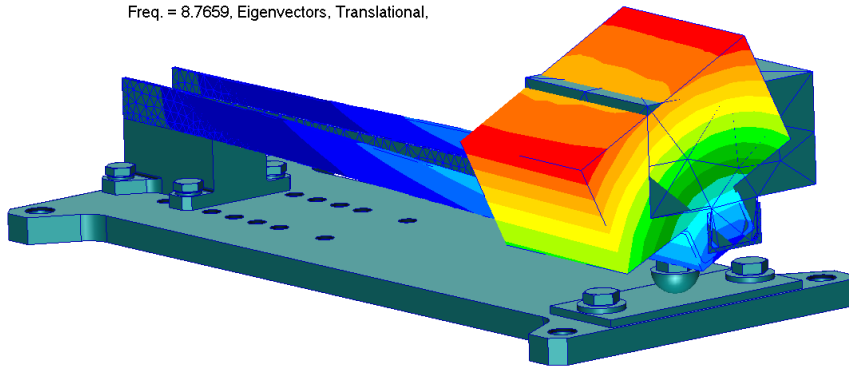


Рисунок 3.11.

Перемещения при частоте колебаний приспособления в состоянии распора, крутильная составляющая

Freq. = 46.513, Eigenvectors, Translational,

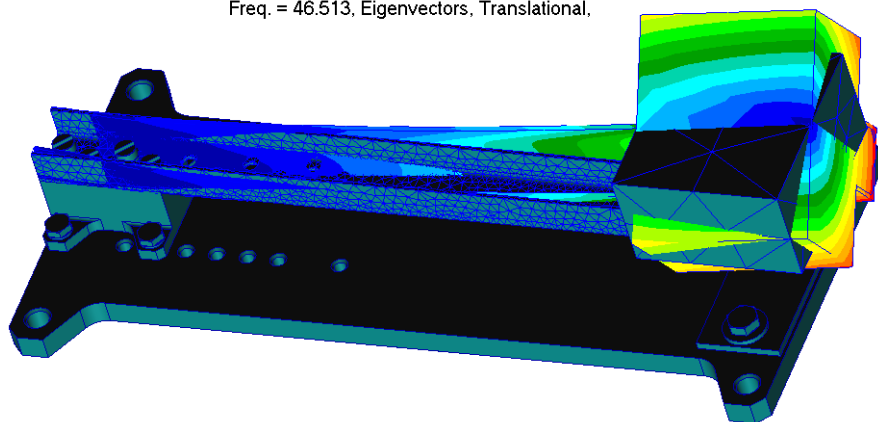


Рисунок 3.12.

Перемещения при частоте колебаний приспособления в состоянии распора, изгиб с кручением

:Mode 4 : Freq. = 121.98, Eigenvectors, Translational,

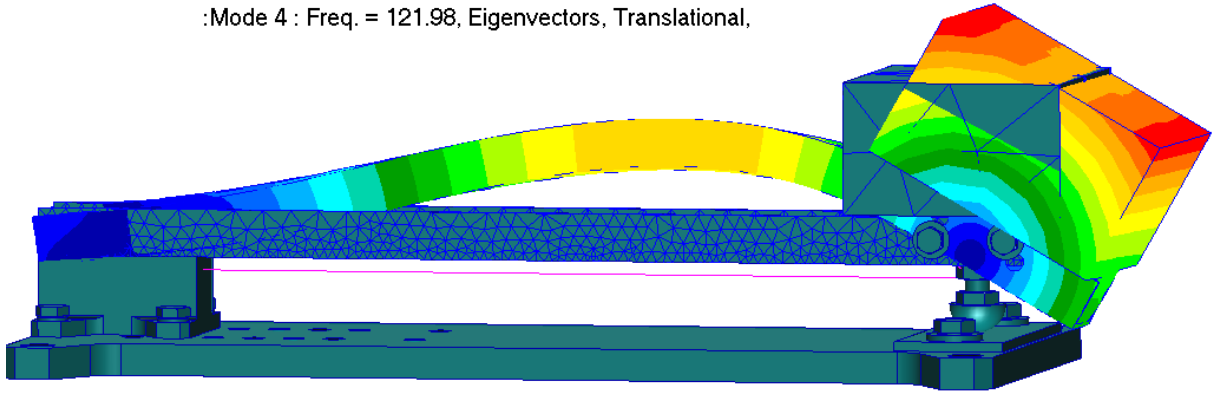


Рисунок 3.13.

Перемещения при частоте колебаний приспособления в состоянии распора, изгибная составляющая

Freq. = 343.14, Eigenvectors, Translational,

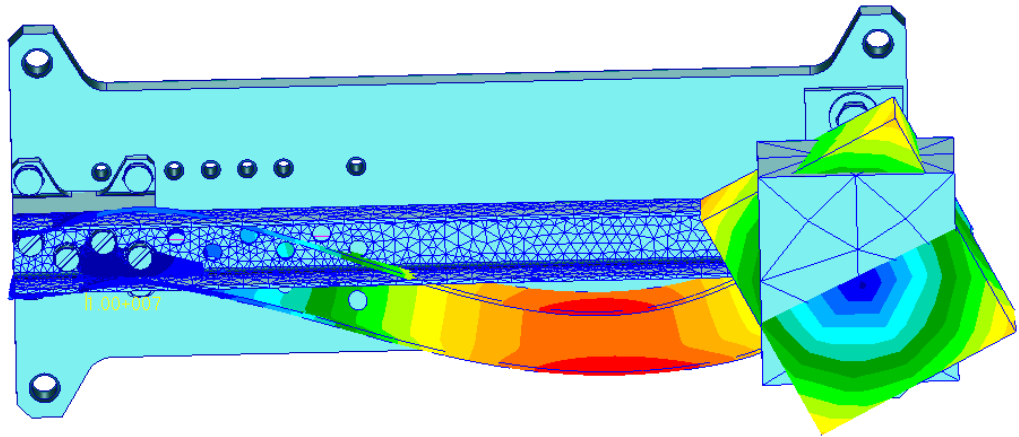


Рисунок 3.14.

Формы колебаний приспособления на частотах до 1000 Гц

Freq. = 698.65, Eigenvectors, Translational,

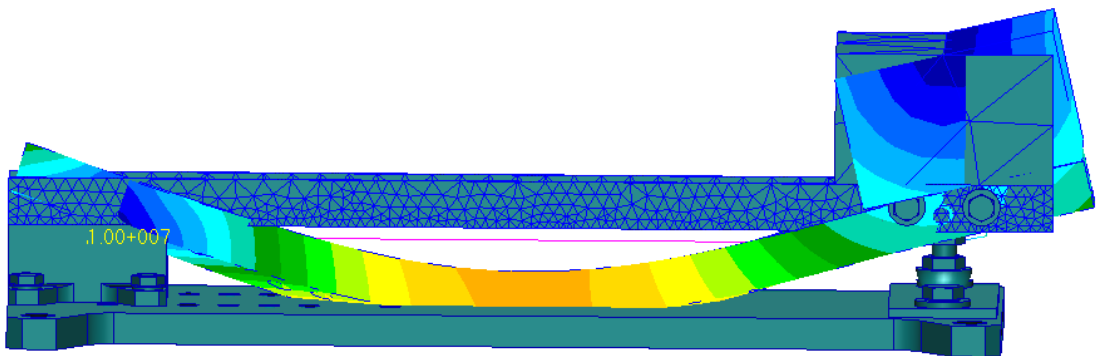


Рисунок 3.15.

Формы колебаний приспособления на частотах до 1000 Гц

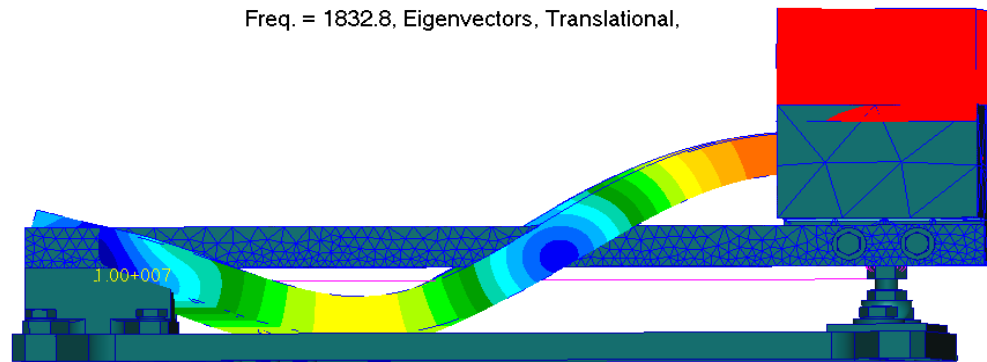


Рисунок 3.16.
Формы колебаний приспособления на частотах 1832 Гц

Для расчета величины момента затяжки сферического упора проанализируем процесс нагружения при случайной широкополосной вибрации. Зададим спектр сигнала, соответствующий режимам испытаний. Среднее квадратичное значение сигнала в спектре 20-2000 Гц равно 11,92 g (Рисунок 3.17).

При задании режима вибрации в вертикальном направлении (вдоль оси упора) спектральная плотность ускорений для вершин груза приведена на Рисунке 3.18. Можно видеть, что резонансные колебания груза по направлению воздействия соответствуют окolorезонансным диапазонам 120-140 Гц, 600-800 Гц, 1600-2000 Гц. Накопленное среднее квадратичное значение усилий в вертикальном направлении на приспособлении приведено на Рисунке 3.19.

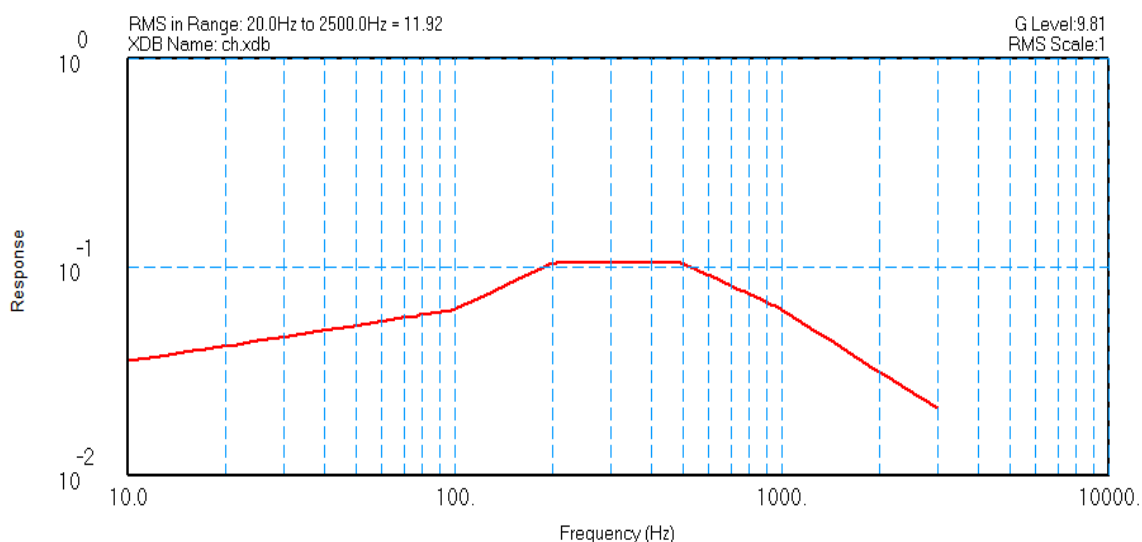


Рисунок 3.17.

Среднее квадратичное значение спектрального сигнала воздействия на приспособление в спектре 20-2000 Гц при случайной широкополосной вибрации

Power Spectral Density Response
Acceleration, Ty
Y-Scale = 1/G²

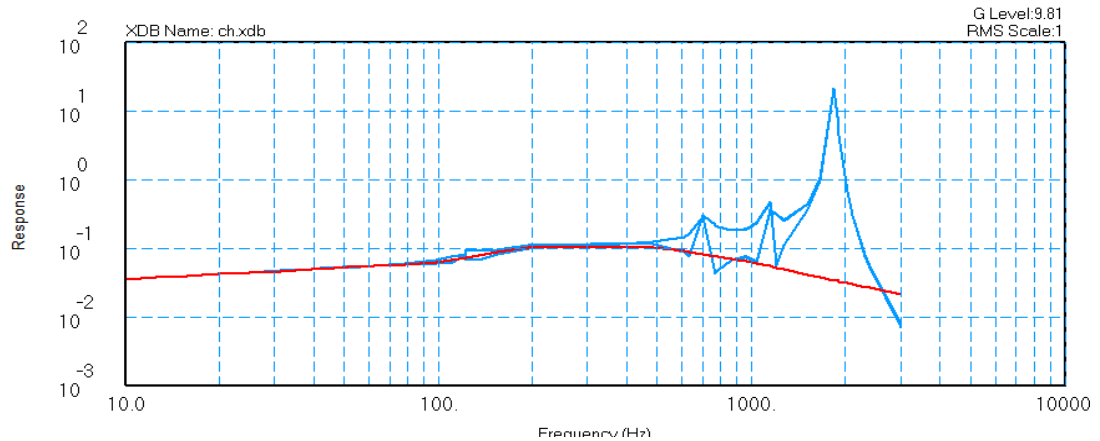


Рисунок 3.18.

Спектральная плотность ускорений для вершины груза при задании режима вибрации в вертикальном направлении

Cumulative RMS
Force, CBAR, Axial

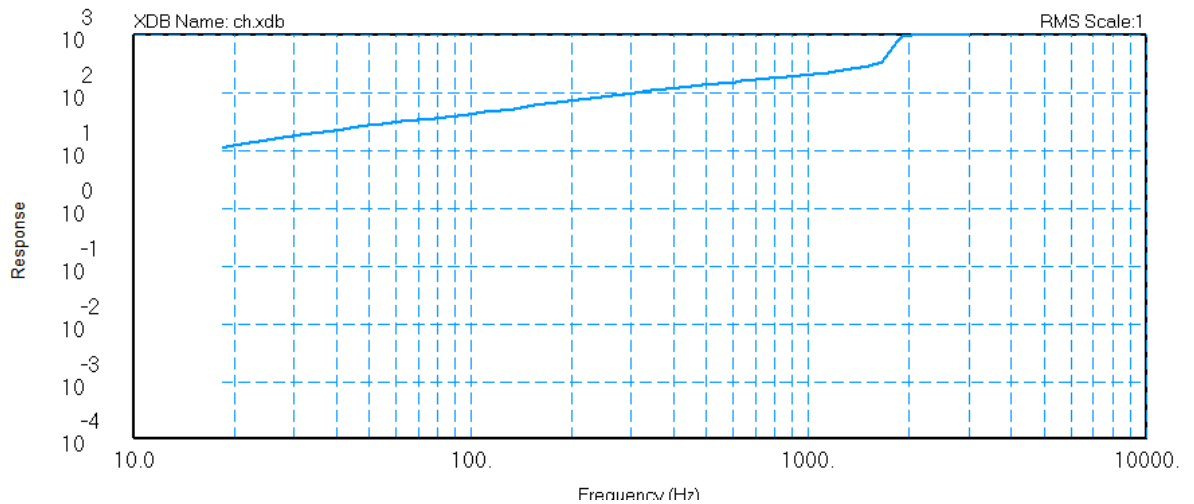


Рисунок 3.19.

Накопленное среднее квадратичное значение усилия для случая вертикальной вибрации приспособления

Спектральная плотность ускорений для вершин груза при задании режима в боковом направлении приведена на Рисунке 3.20. Можно видеть, что резонансные колебания груза по направлению воздействия соответствуют околорезонансным диапазонам 40-50 Гц и 120-140 Гц.

Power Spectral Density Response

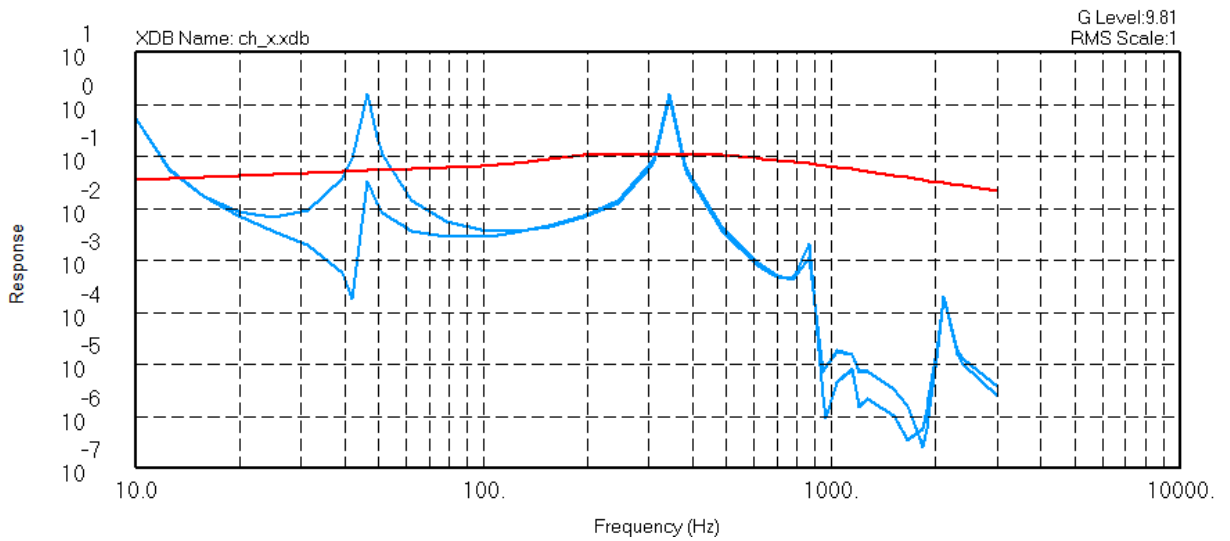
Acceleration, Tx
Y-Scale = 1/G²

Рисунок 3.20.

Спектральная плотность ускорений для вершины груза в случае задания режима в боковом направлении

Накопленное осевое усилие (среднее квадратичное значение) для случая боковой вибрации приведено на графике (Рисунок 3.21). Значение усилия при боковых колебаниях практически не меняется.

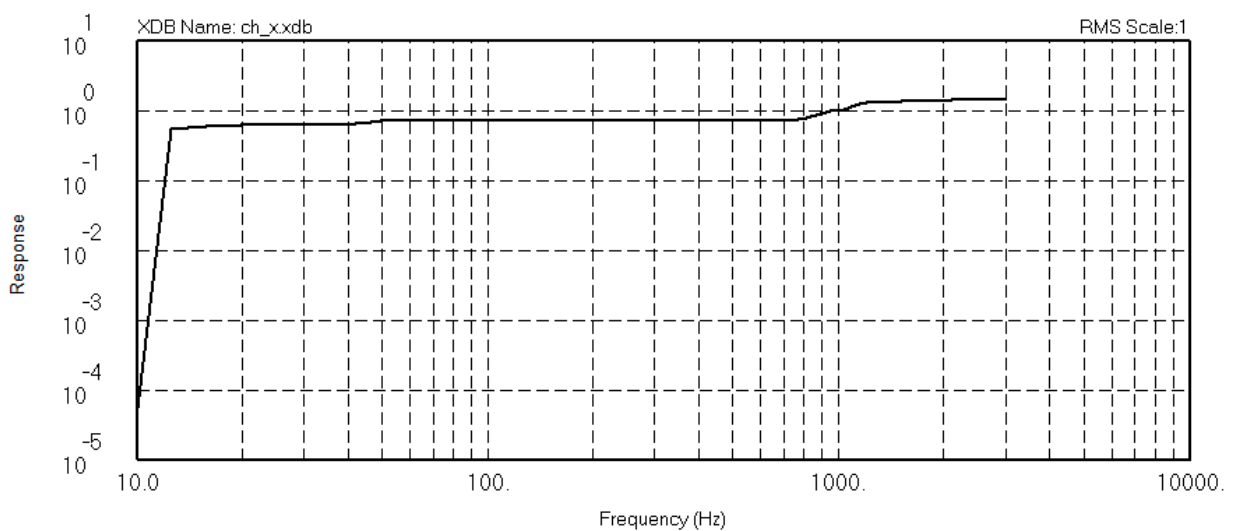
Cumulative RMS
Force, CBAR, Axial

Рисунок 3.21.

Накопленное среднее квадратичное значение усилия для случая боковой вибрации приспособления

Таким образом, при испытаниях необходимо создавать преднатяг упора с усилием, превышающим 1,1 кН за счет момента затяжки, чтобы повысить жесткость конструкции и минимизировать удары в стыке упора.

3.4. Разработка и исследование режимов воздействий на контактную пару

Для проведения испытаний по воздействию вибрационных режимов на образец контактной пары применен виброкомплекс модели V984LS (149), изготовитель – DS Ling - Blackmagicdesign Manufacturing Pte Ltd. Управление проводилось по показаниям акселерометров Д1-Д4 типа AP2037, закрепленных на столе виброкомплекса вблизи точек крепления приспособления. Характеристики воздействия нагрузки на контактную пару контролируются акселерометром Д5, установленном на массовом имитаторе приспособления (Рисунок 3.22).

Обработка информации и управление виброкомплексом велись с помощью многофункциональной системы LMS SCADAS III. Воздействия проводились в направлении оси «Z» испытываемой сборки (Рисунок 3.6).

Условия проведения эксперимента – нормальные климатические условия согласно ГОСТ 28198-89.

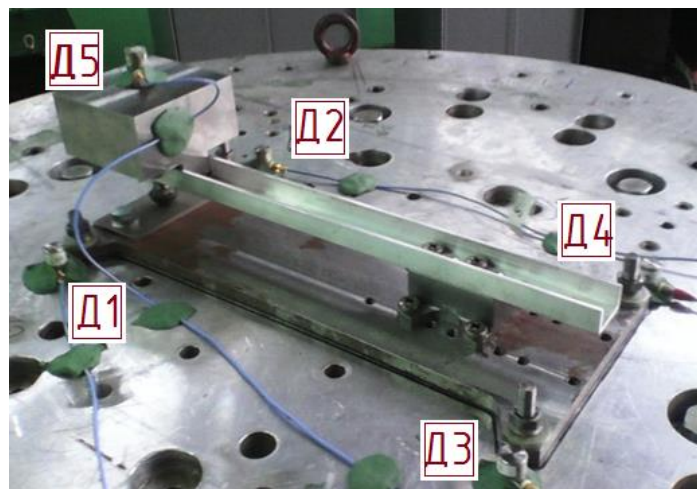


Рисунок 3.22.

Схема установки приспособления на вибростенде.

Д1-Д4 – управляющие акселерометры; Д5 – контрольный акселерометр

Перед и после испытаний на заданных режимах вибронагрузений необходимо проводить испытания по определению критических частот в диапазоне от 5 до 200 Гц на режимах, представленных в Таблице 9. Скорость

изменения частоты составляла $1 \frac{\text{окт}}{\text{мин}}$. Значение уровня вибрации принято

задавать в g (ускорение свободного падения, принимается равным $9,81 \frac{m}{c^2}$).

Данные испытания проводят для контроля надёжности крепежных соединений. В случае выявления люфтов и разбалтывания крепежа системы экспериментальная установка пересобирается, и проводят повторную экспериментальную отработку с новым образцом.

Таблица 9.

Режимы испытаний по определению критических частот

| | | | | | |
|--------------------------------|------|-------|-------|-------|--------|
| Диапазон частот, Гц | 5-10 | 10-20 | 20-40 | 40-80 | 80-200 |
| Уровень виброн нагружений, g | 0,15 | 0,2 | 0,3 | 0,5 | 1,0 |

Испытания на синусоидальную вибрацию на режимах, представленных в Таблице 10, проводили в частотном интервале от 5 до 20 Гц. Скорость изменения частоты составляла $1 \frac{\text{окт}}{\text{мин}}$.

Таблица 10.

Режим испытаний на синусоидальную вибрацию

| | | |
|--------------------------------|------|---------|
| Диапазон частот, Гц | 5-10 | 10-20 |
| Уровень виброн нагружений, g | 0,5 | 0,5-0,6 |

Испытания на случайную вибрацию на режимах, представленных в Таблице 11, проводили в частотном интервале от 20 до 2000 Гц.

Таблица 11.

Режимы испытаний на случайную вибрацию

| | | | | | | | |
|--------------------------|----------------------------|-----------|-----------|----------|------------|-------------|-------------|
| Время действия режима, с | Диапазон частот, Гц | 20-50 | 50-100 | 100-200 | 200-500 | 500-1000 | 1000-2000 |
| 120 | Уровень виброн нагружений, | 0,04-0,05 | 0,05-0,06 | 0,06-0,1 | 0,1 | 0,1-0,06 | 0,06-0,03 |
| 480 | $\frac{g^2}{Гц}$ | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,02-0,008 | 0,008-0,004 | 0,004-0,002 |

Диаграммы показаний акселерометров Д1-Д5 во время эксперимента приведены на Рисунках 3.23-3.39.

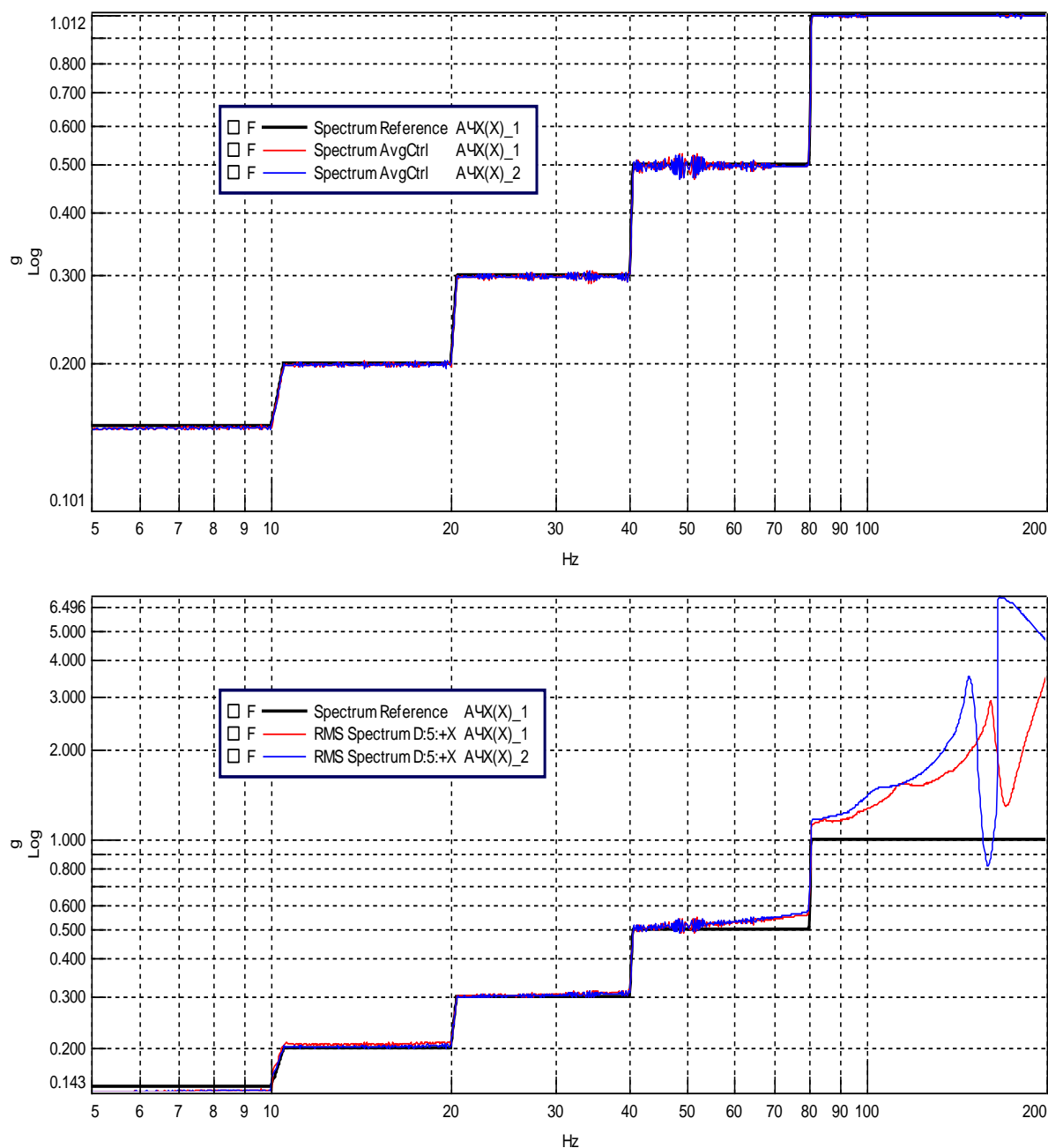


Рисунок 3.23.

Испытания по выявлению критических частот, АЧХ 1 и АЧХ 2.

Значения задаваемого режима виброн нагружения приведены на графике черным цветом. Синим и красным цветом обозначены показания акселерометра Д5.

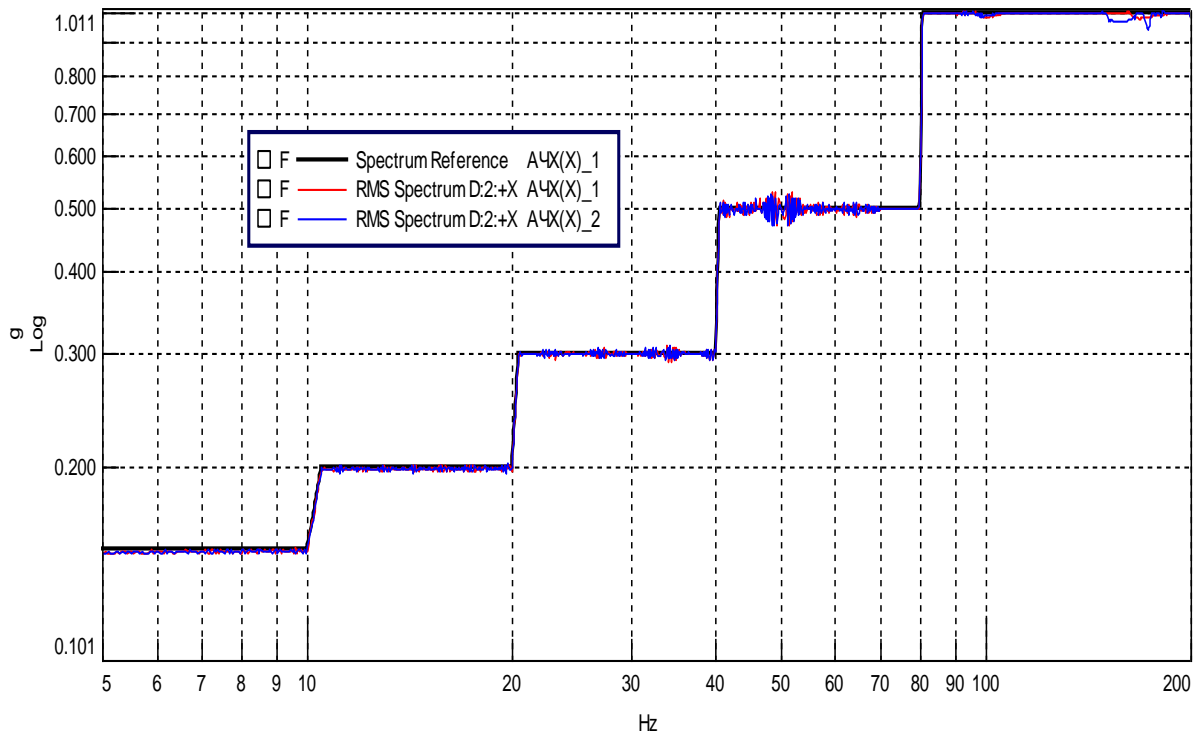
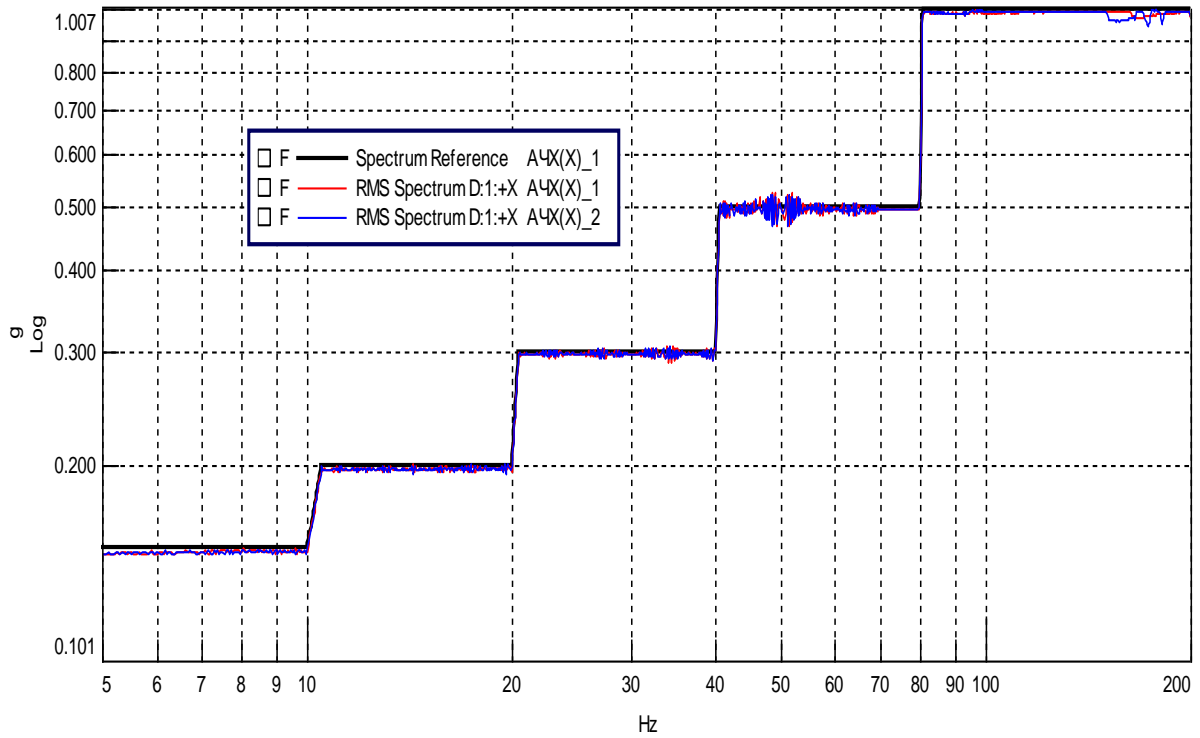


Рисунок 3.24.

Испытания по выявлению критических частот, АЧЧ 1 и АЧХ 2. Значения задаваемого режима виброн нагружения приведены на графике черным цветом. Синим и красным цветом обозначены показания акселерометров Д1 (верхний график), Д2 (нижний график)

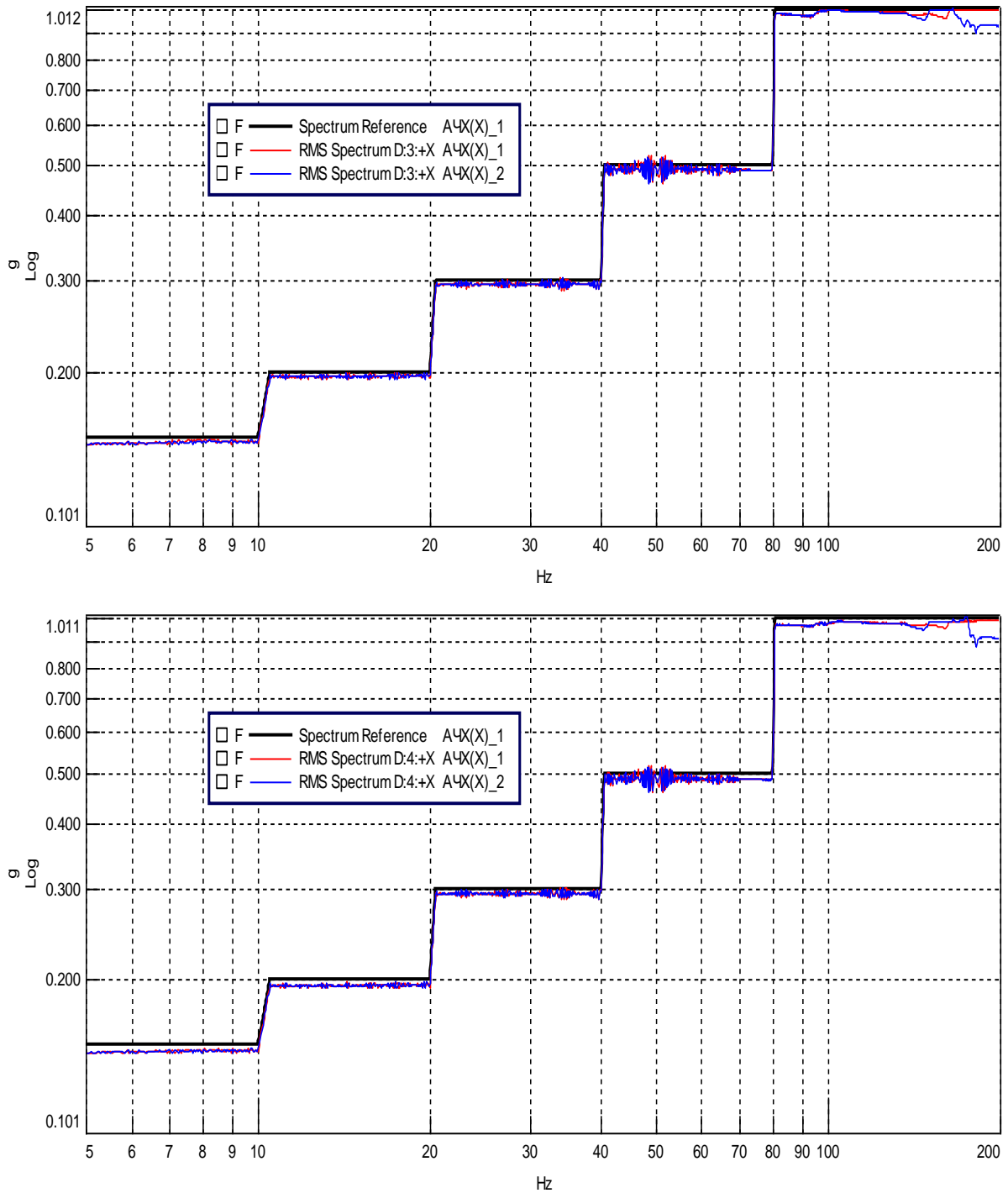


Рисунок 3.25.

Испытания по выявлению критических частот, АЧЧ 1 и АЧХ 2. Значения задаваемого режима виброн нагружения приведены на графиках черным цветом. Синим и красным цветом обозначены показания акселерометров Д3 (верхний график), Д4 (нижний график)

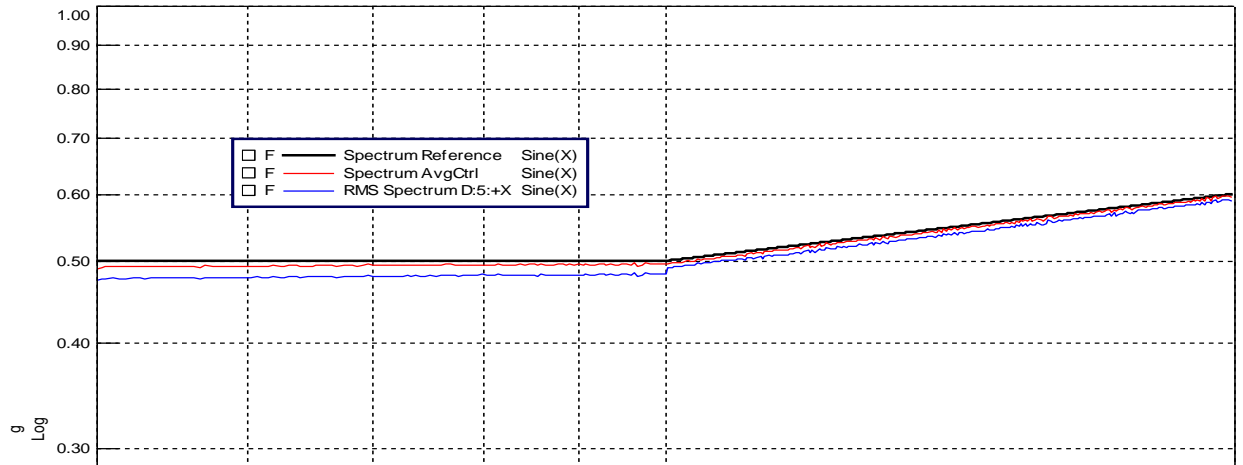


Рисунок 3.61.

Испытания на синусоидальную вибрацию. Значения задаваемого режима вибронагружения приведены на графике черным цветом. Синим и красным цветом обозначены показания акселерометра Д5

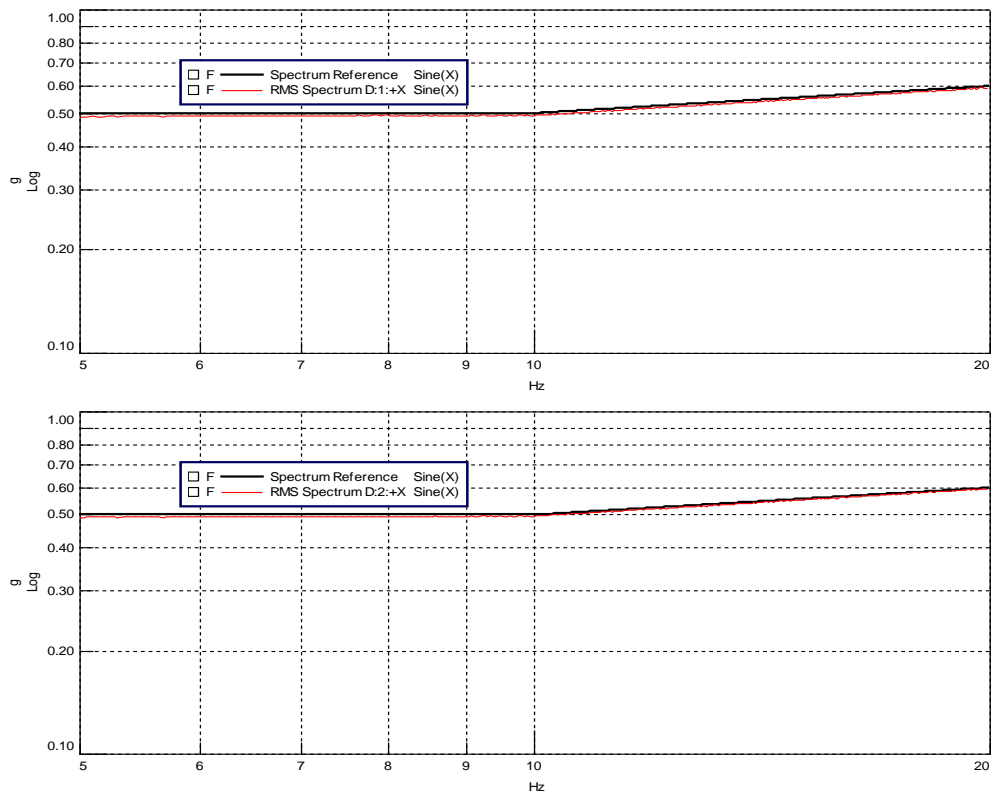


Рисунок 3.26.

Испытания на синусоидальную вибрацию. Значения задаваемого режима вибронагружения приведены на графике черным цветом. Красным цветом обозначены показания акселерометров Д1 (верхний график), Д2 (нижний график)

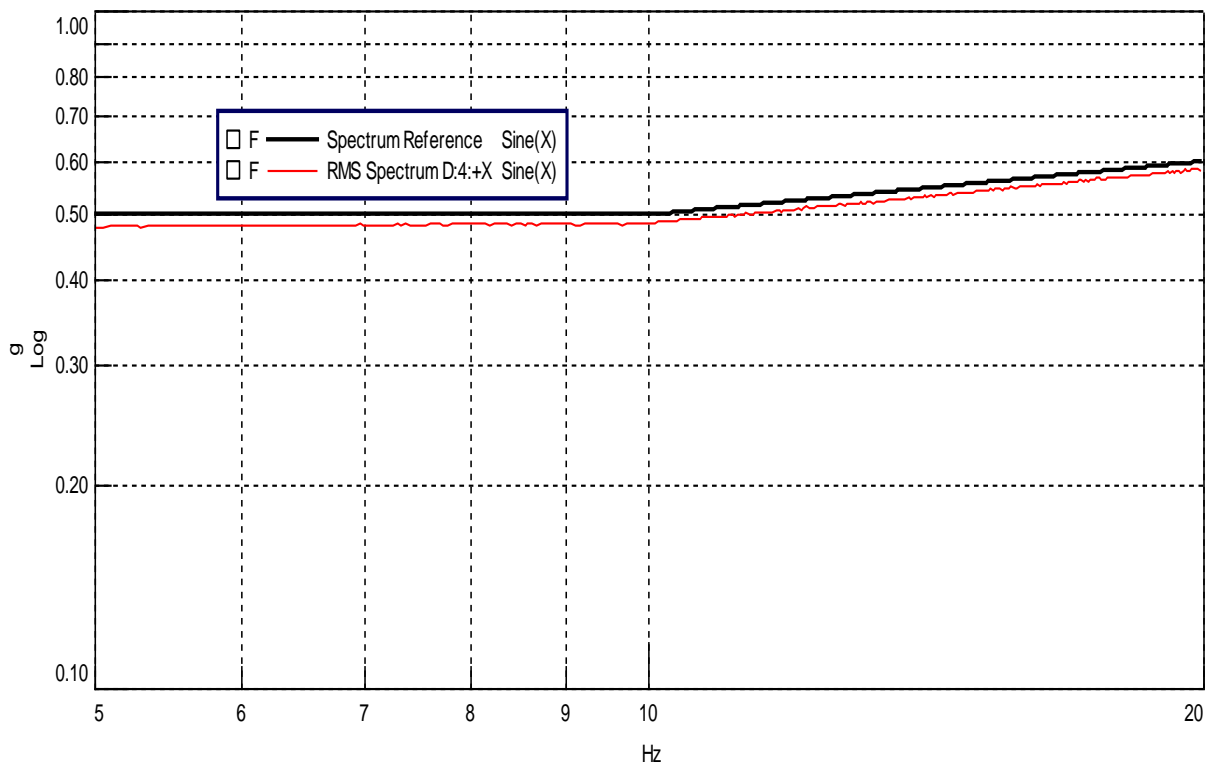
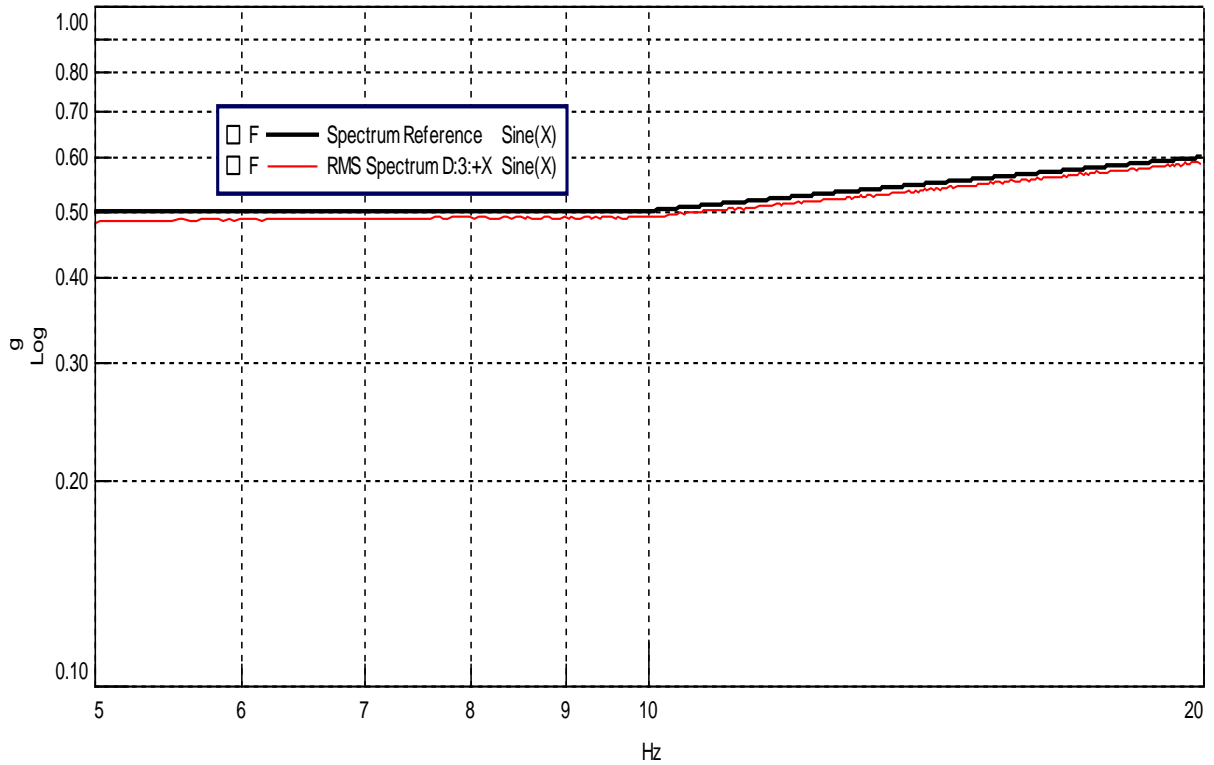


Рисунок 3.27.

Испытания на синусоидальную вибрацию. Значения задаваемого режима вибронгружения приведены на графике черным цветом. Красным цветом обозначены показания акселерометров Д3 (верхний график), Д4 (нижний график)

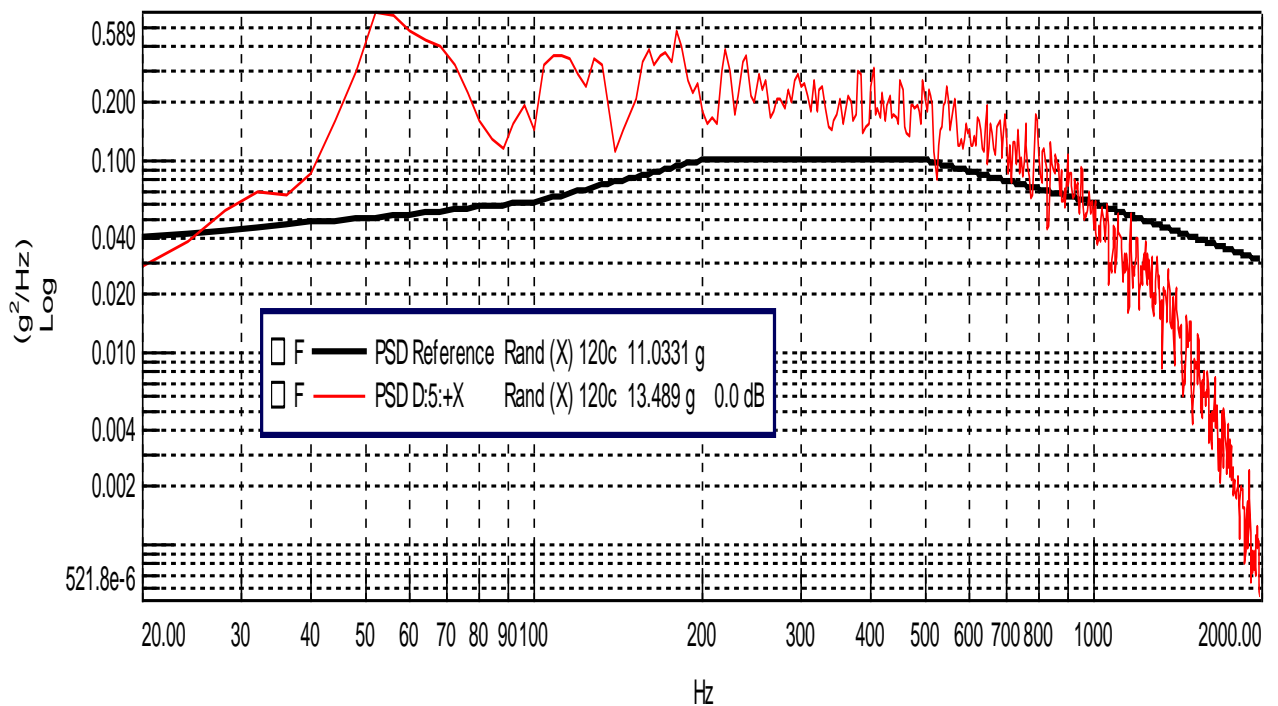
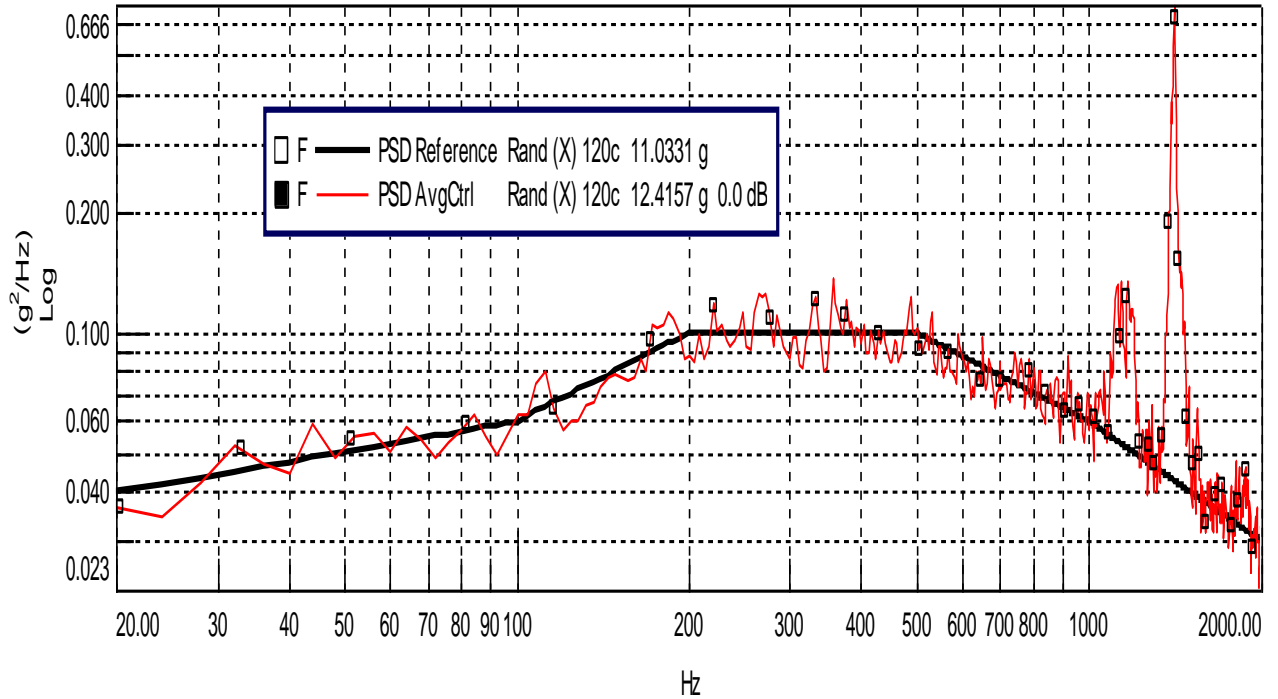


Рисунок 3.28.

Испытания на воздействие случайной вибрации, время воздействия 120 с, интенсивность 0 дБ. Значения задаваемого режима вибронагружения приведены на графике черным цветом. Красным цветом обозначены показания акселерометра Д5

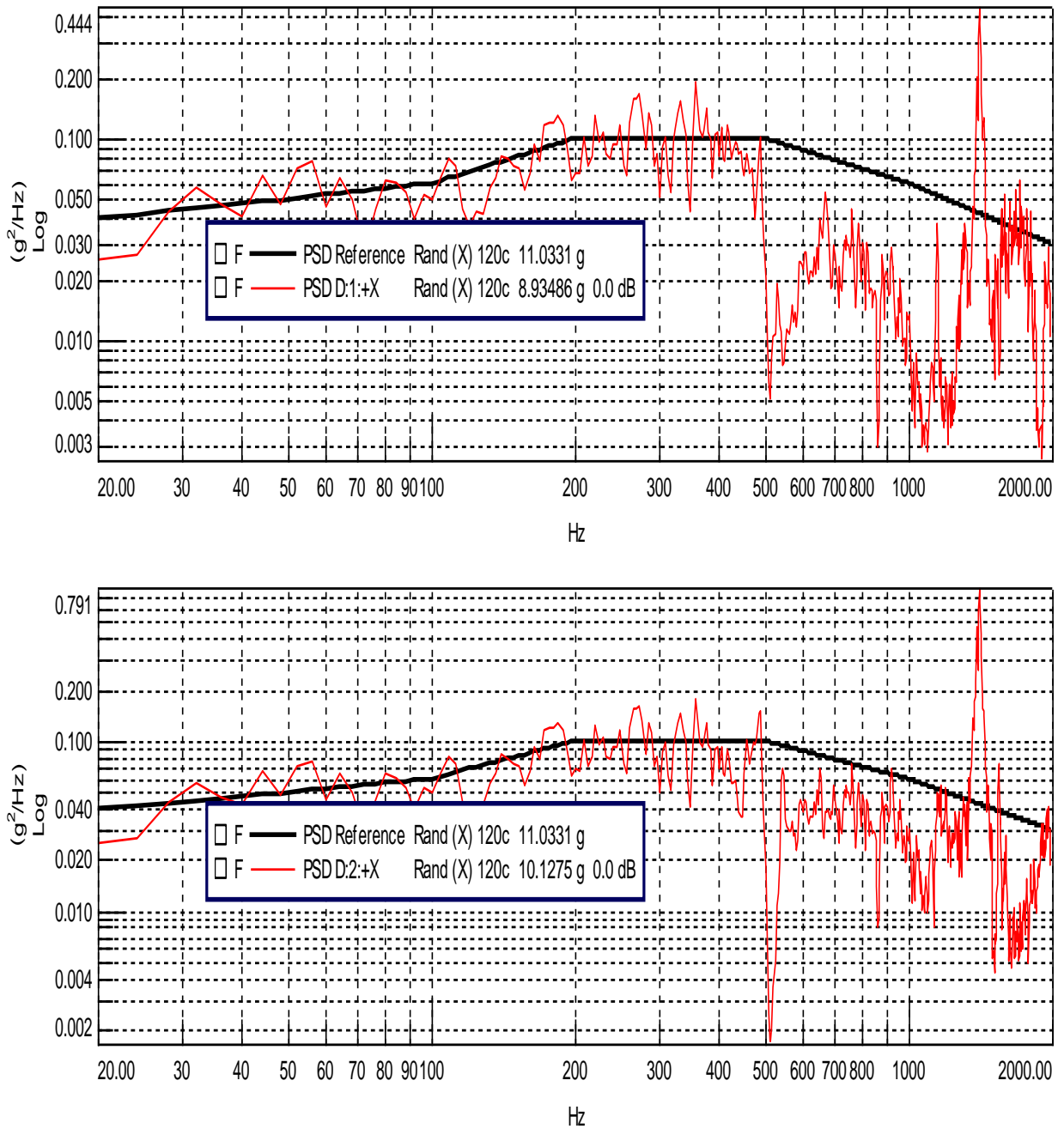


Рисунок 3.29.

Испытания на случайную вибрацию, время 120 с, интенсивность 0 дБ. Значения задаваемого режима вибронгружения приведены на графике черным цветом. Красным цветом обозначены показания акселерометров Д1 (верхний график) и Д2 (нижний график)

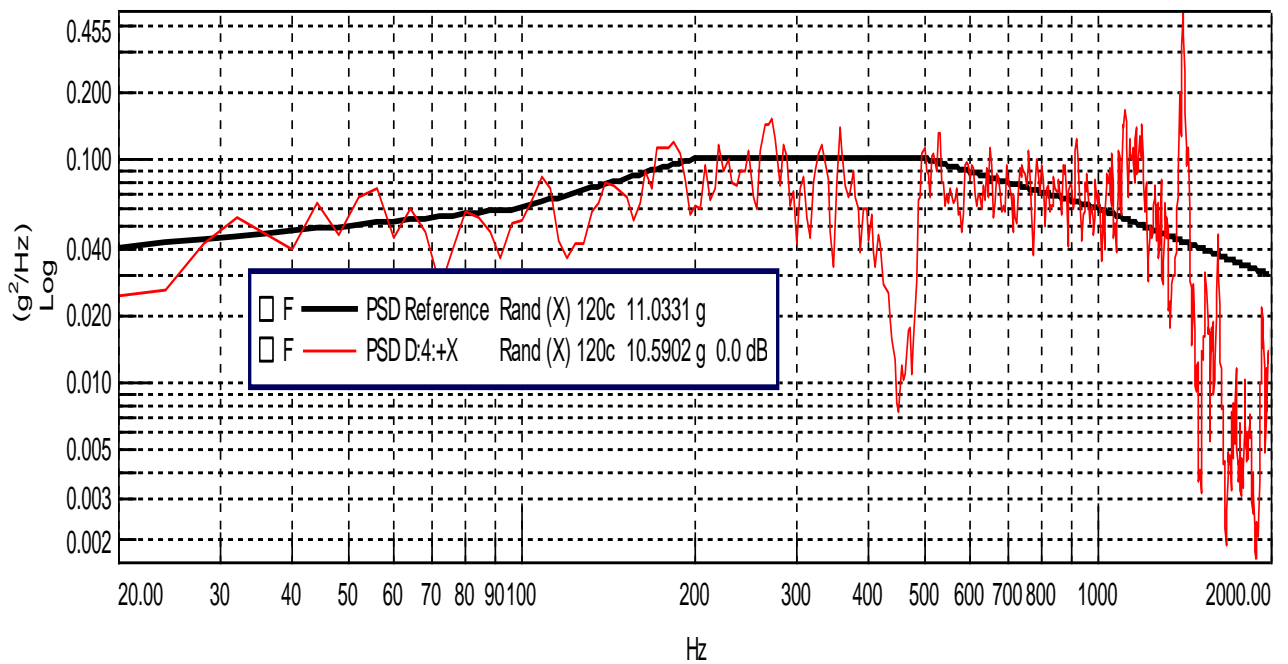
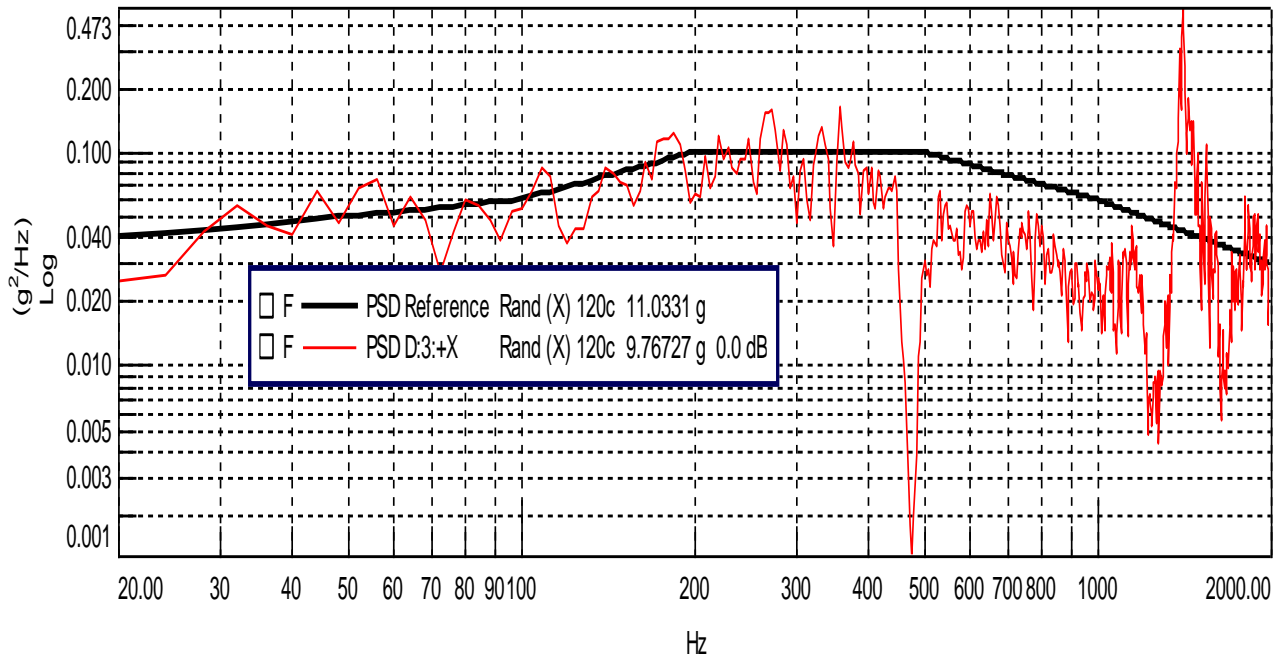


Рисунок 3.30.

Испытания на случайную вибрацию, время 120 с, интенсивность 0 дБ. Значения задаваемого режима вибронагружения приведены на графике черным цветом. Красным цветом обозначены показания акселерометров Д3 (верхний график) и Д4 (нижний график)

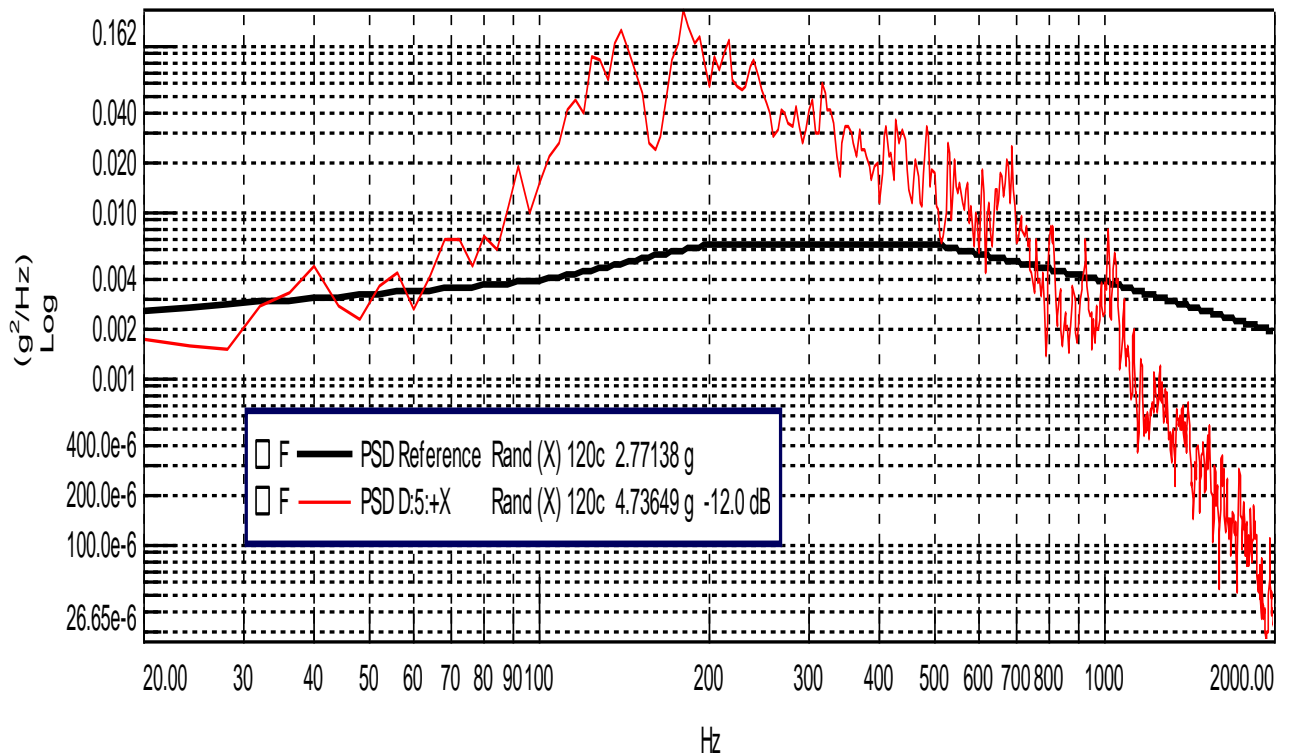
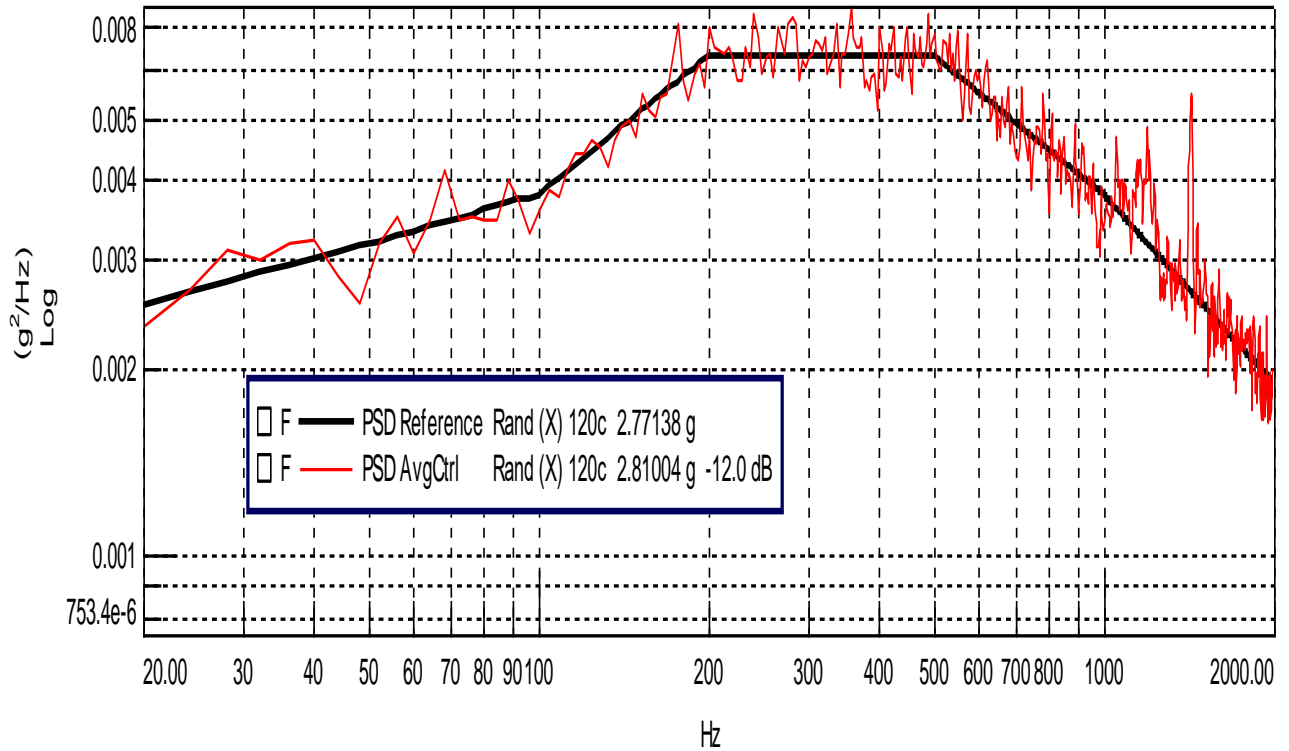


Рисунок 3.31.

Испытания на случайную вибрацию, время 120 с, интенсивность -12 дБ. Значения задаваемого режима виброн нагружения приведены на графике черным цветом.

Красным цветом обозначены показания акселерометра Д5

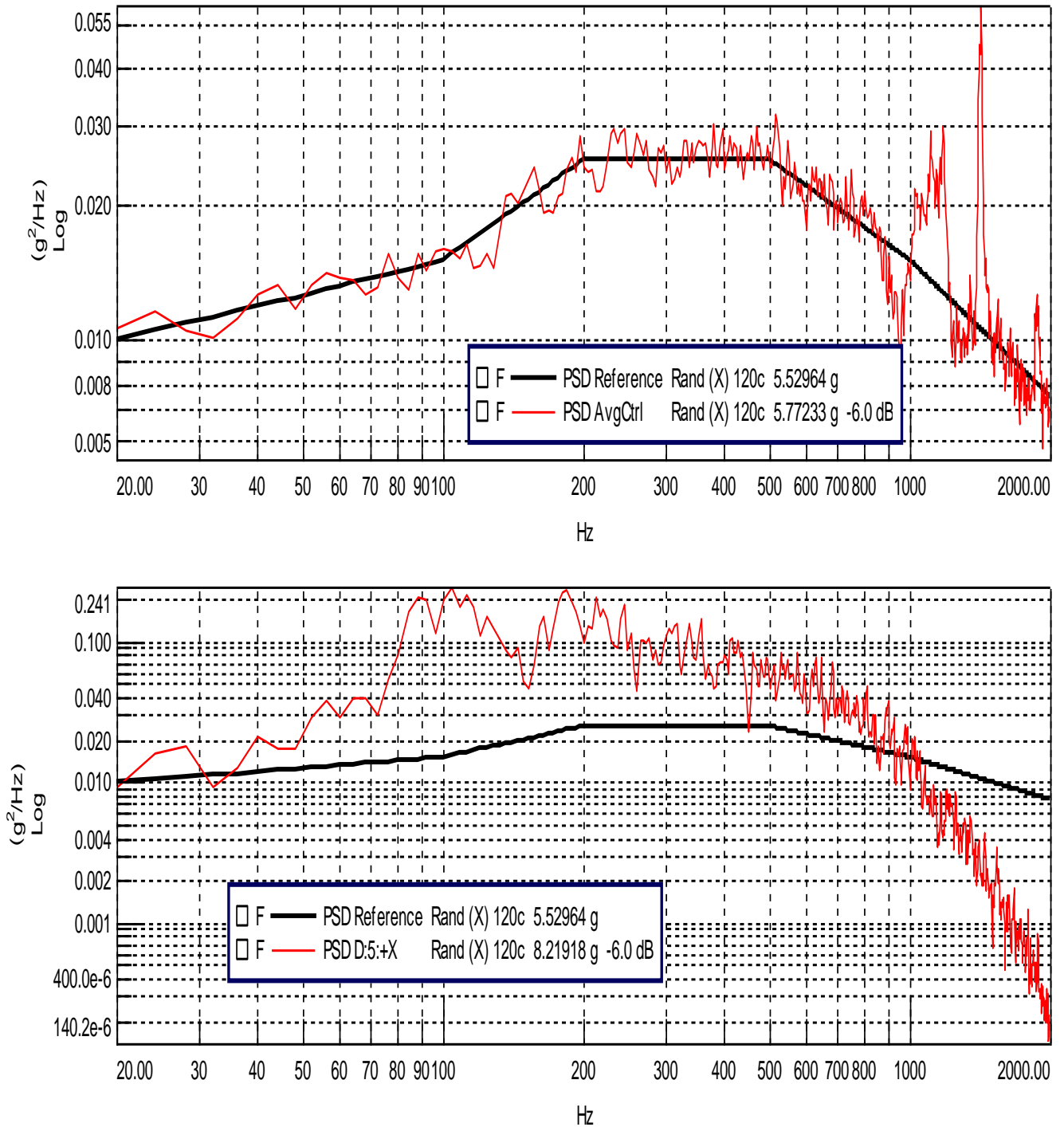


Рисунок 3.32.

Испытания на случайную вибрацию, время 120 с, интенсивность - 6 дБ. Значения задаваемого режима вибронагружения приведены на графике черным цветом, показания акселерометра Д5 приведены на графике красным цветом

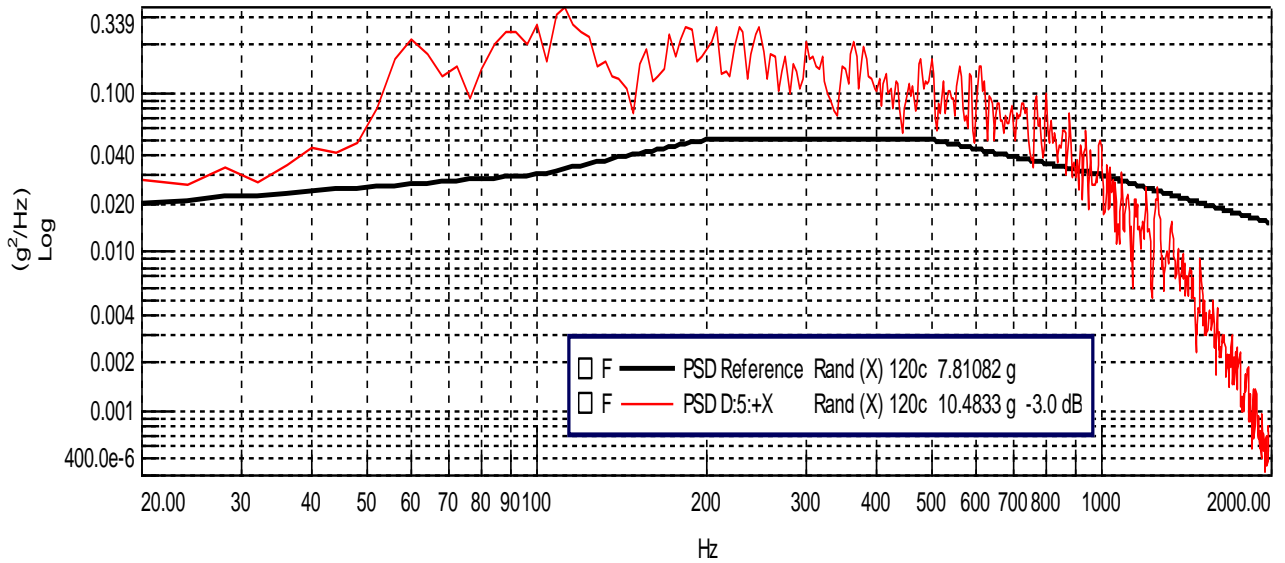


Рисунок 3.33.

Испытания на случайную вибрацию, время 120 с, интенсивность - 3 дБ. Значения задаваемого режима вибронагружения приведены на графике черным цветом, показания акселерометра Д5 приведены на графике красным цветом

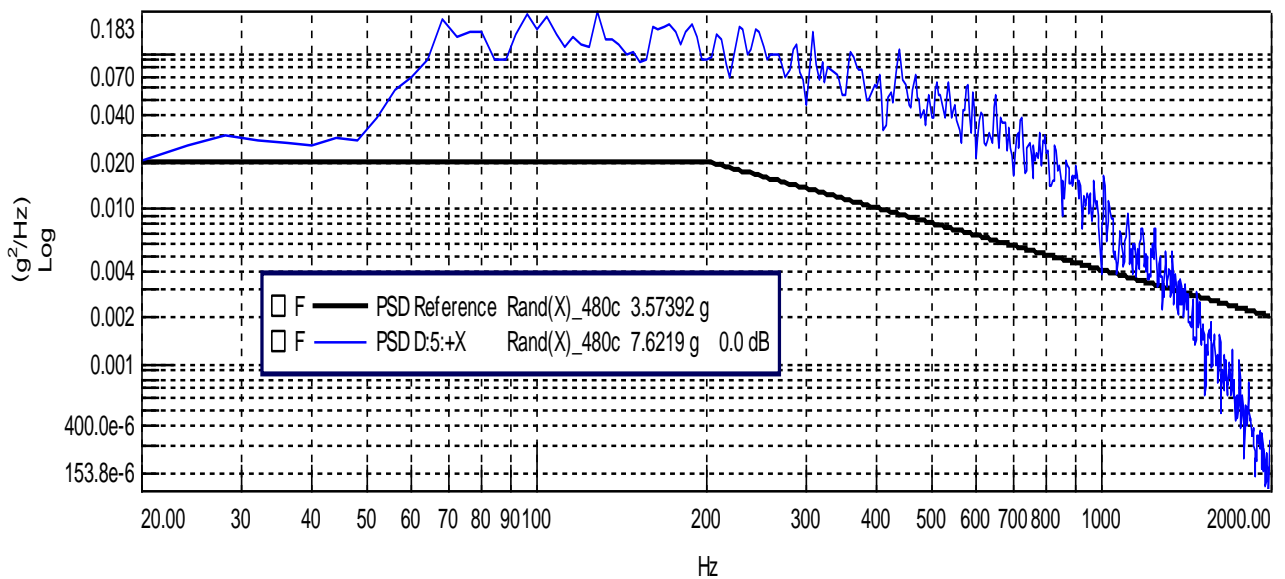


Рисунок 3.34.

Испытания на случайную вибрацию, время 480 с, интенсивность 0 дБ. Значения задаваемого режима вибронагружения приведены на графике черным цветом, показания акселерометра Д5 приведены на графике синим цветом

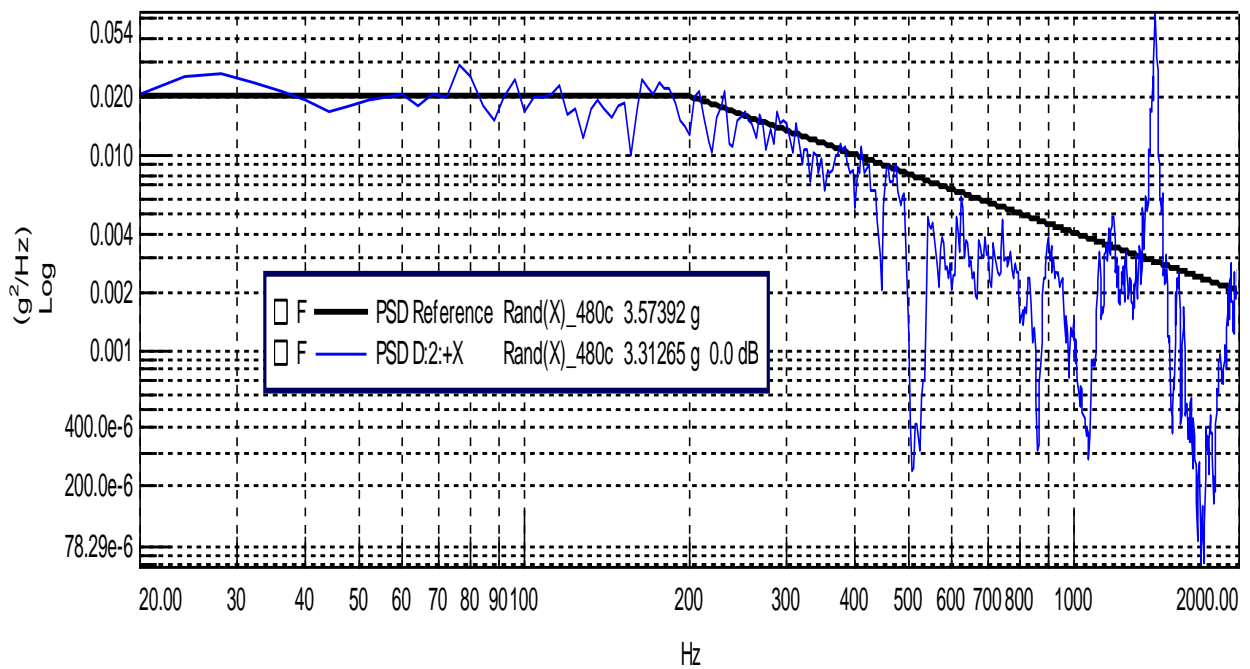
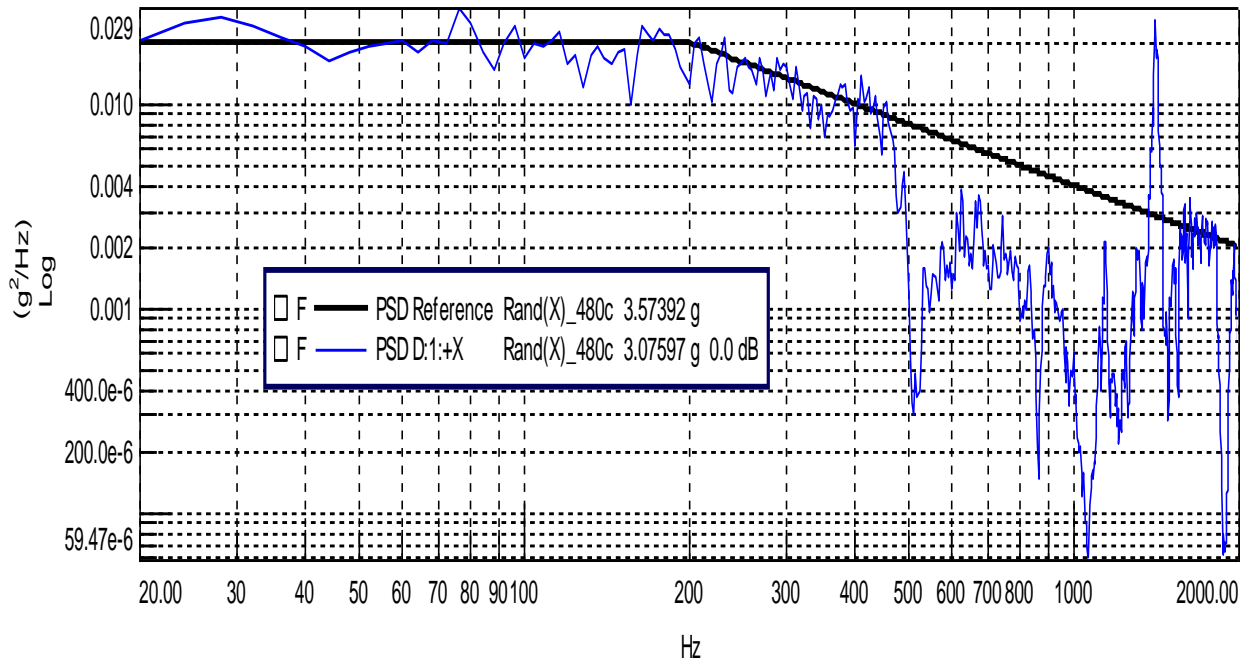


Рисунок 3.35.

Испытания на случайную вибрацию, время 480 с, интенсивность 0 дБ. Значения задаваемого режима вибронагружения приведены на графике черным цветом. Синим цветом обозначены показания акселерометров Д1 (верхний график), Д2 (нижний график)

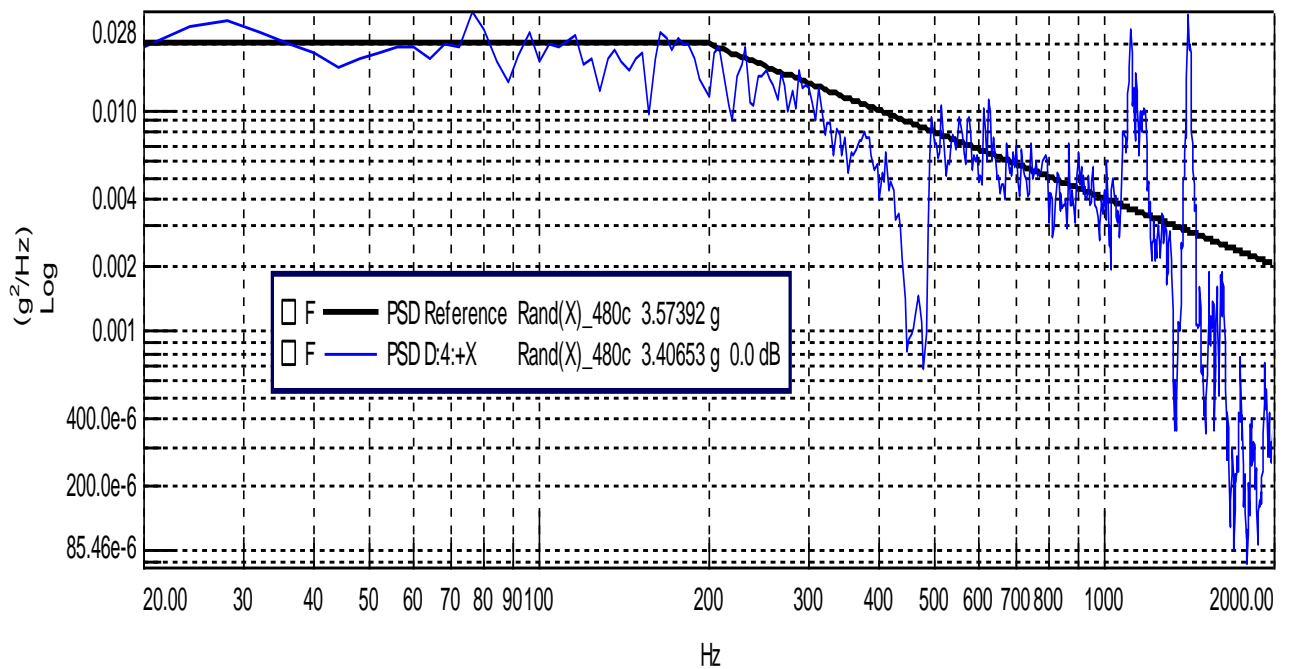
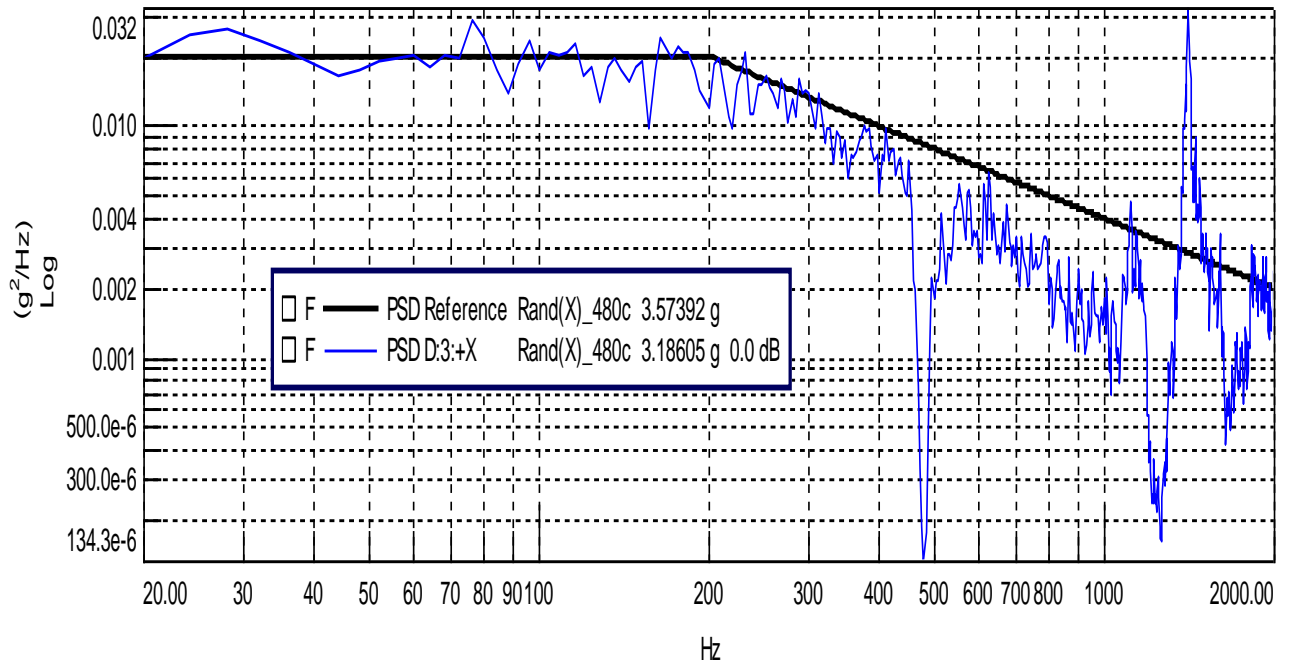


Рисунок 3.36.

Испытания на случайную вибрацию, время 480 с, интенсивность 0 дБ. Значения задаваемого режима вибронагружения приведены на графике черным цветом, показания акселерометров Д3 (верхний Рисунок) и Д4 (нижний Рисунок) приведены на графике синим цветом

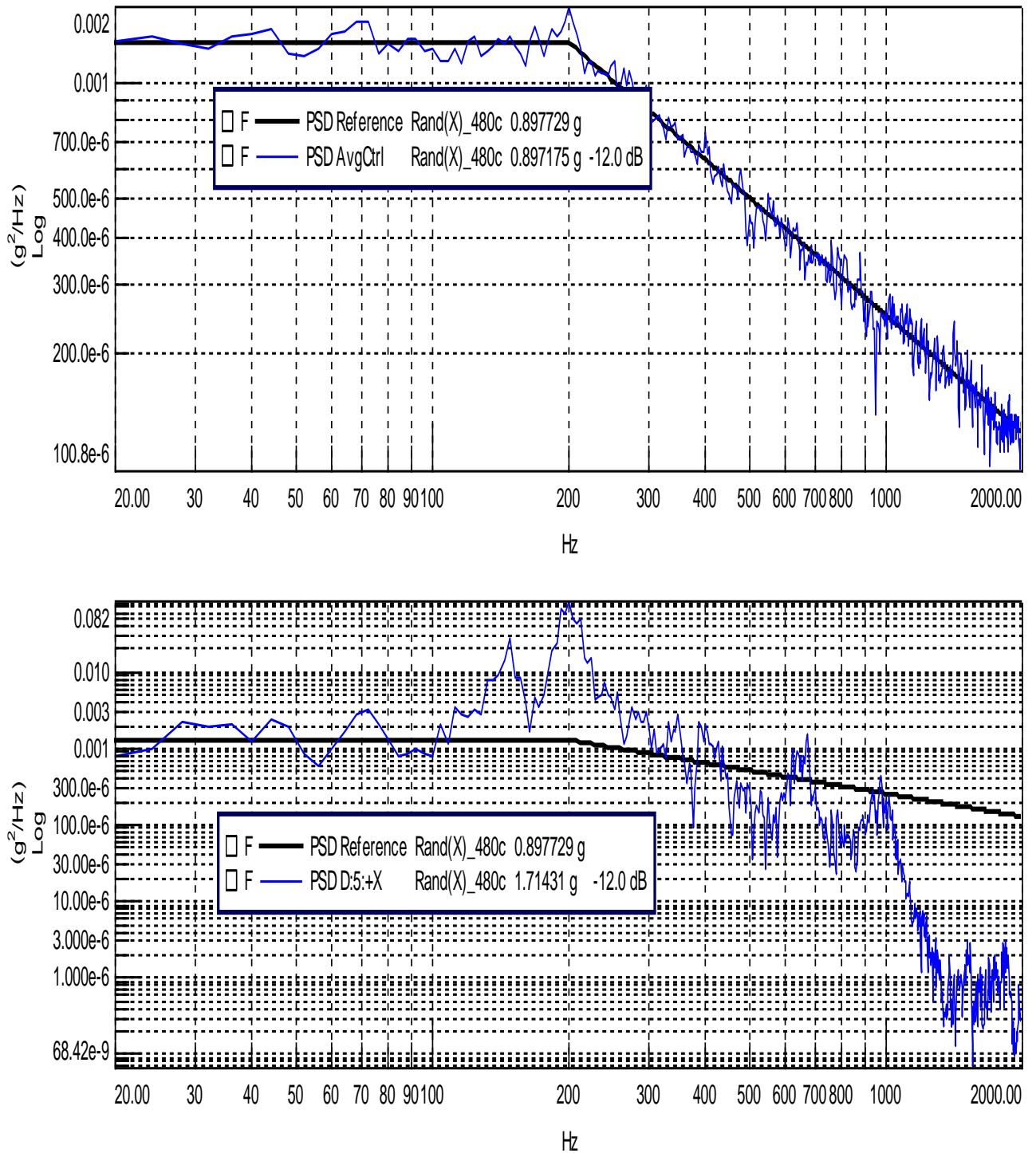


Рисунок 3.37.

Испытания на случайную вибрацию, время 480 с, интенсивность -12 дБ. Значения задаваемого режима виброн нагружения приведены на графике черным цветом, показания акселерометра Д5 приведены на графиках синим цветом

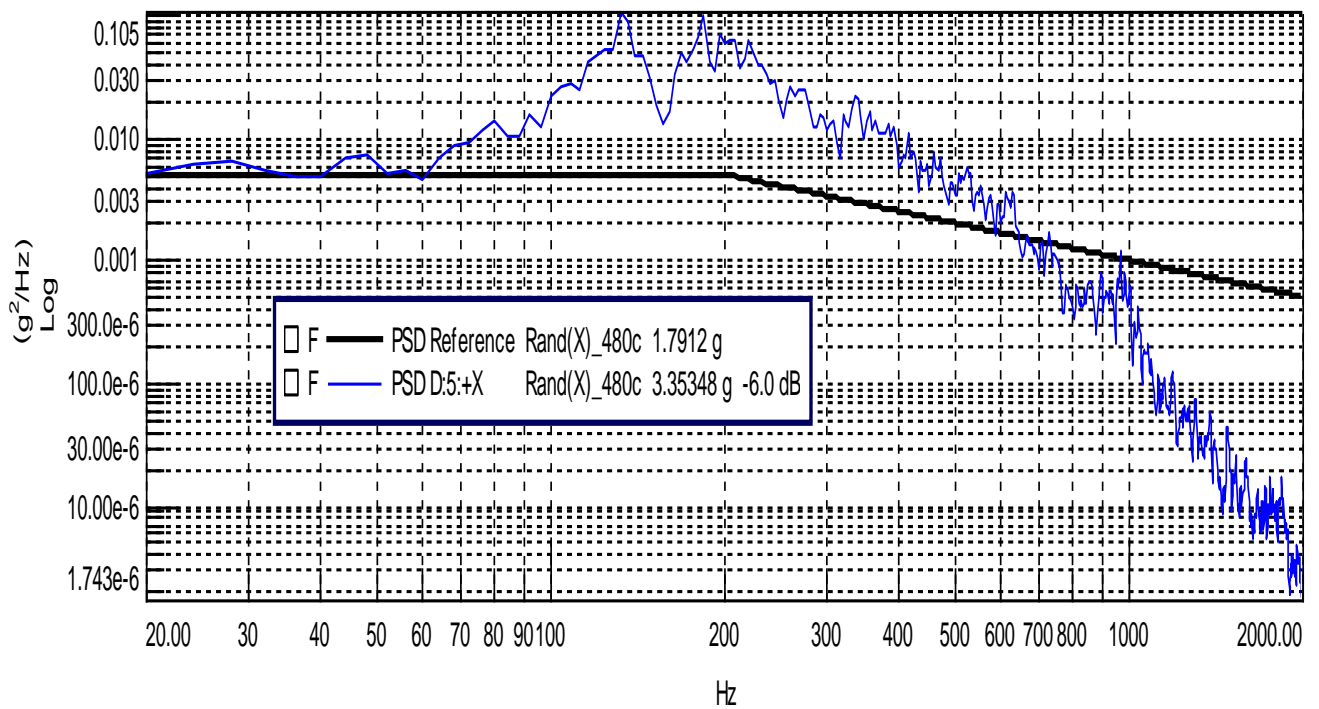
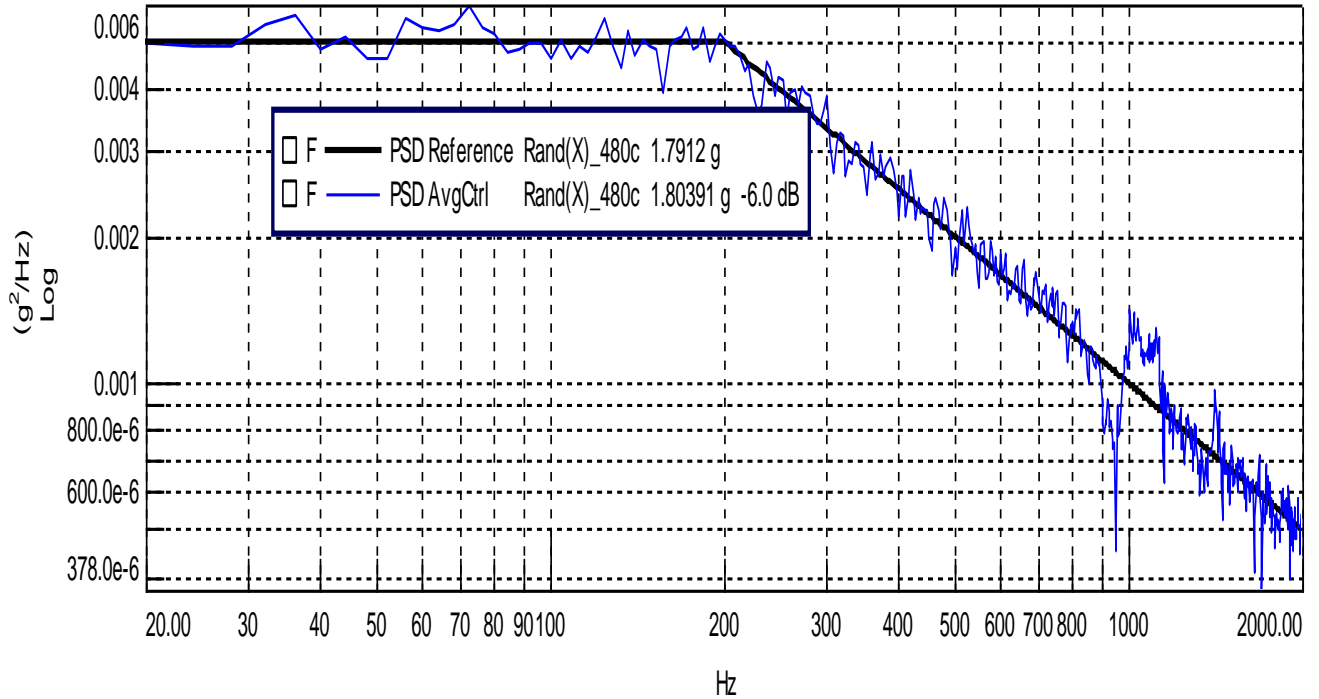


Рисунок 3.38.

Испытания на случайную вибрацию, время 480 с, интенсивность -6 дБ. Значения задаваемого режима вибронгружения приведены на графике черным цветом, показания акселерометра Д5 приведены на графиках синим цветом

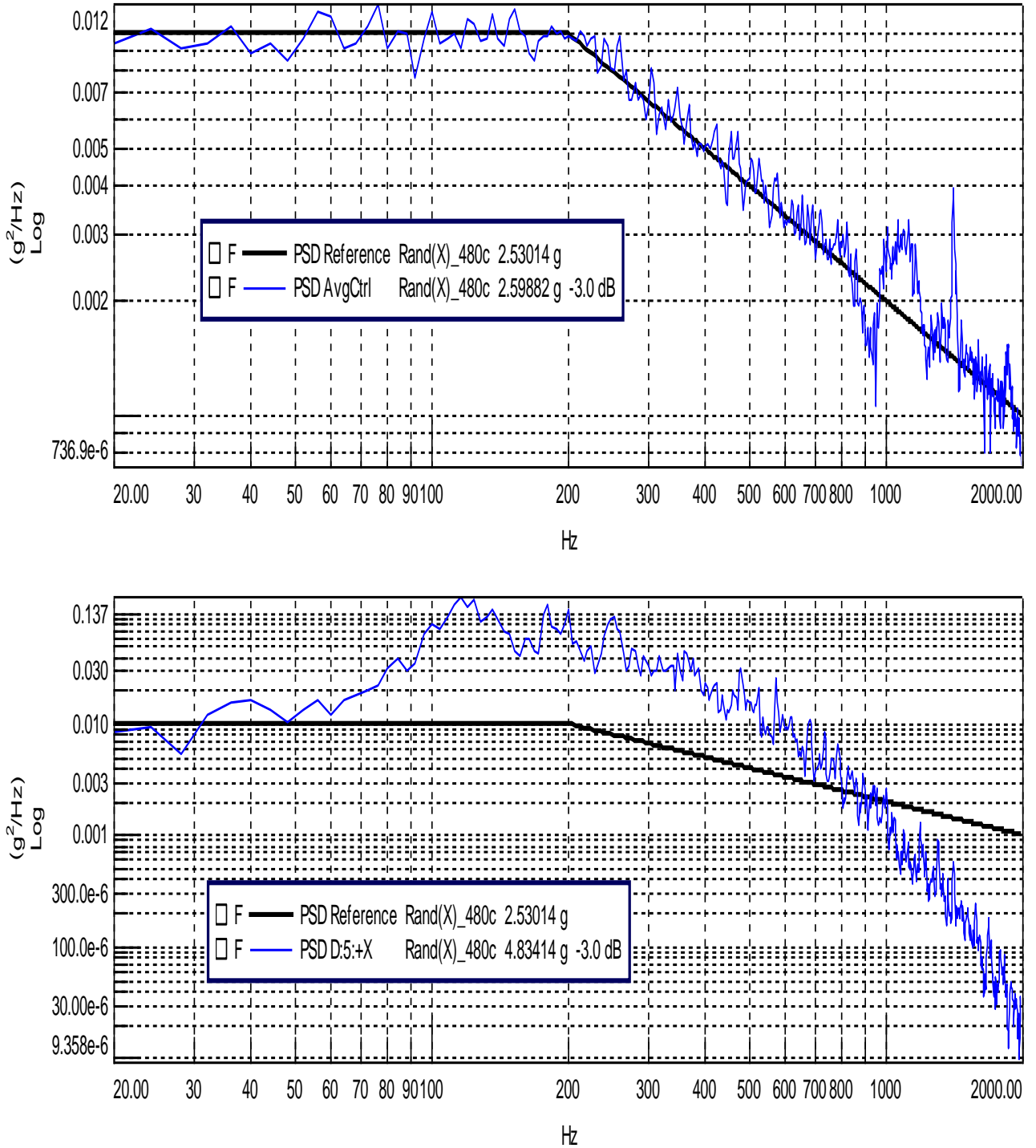


Рисунок 3.39.

Испытания на случайную вибрацию, время 480 с, интенсивность 3 дБ. Значения задаваемого режима вибронагружения приведены на графике черным цветом, показания акселерометра Д5 приведены на графиках синим цветом.

Из графиков на Рисунках 3.23-3.39 видно, что при испытаниях на вибрацию в экспериментальной модели не происходит резонансных явлений. Следовательно, компьютерное моделирование в программной среде ANSYS адекватно описывает данную модель и значение предварительного момента затяжки упора для данной системы рассчитано верно. Кроме того, отсутствие резких изменений амплитуды колебаний свидетельствует о том, что процесс износа опытных происходит равномерно, без скачкообразных изменений. Данный факт подтверждает последовательный характер стадий износа опытного образца, описанный в разделе 3.1.

Выводы по Главе 3

1. Рассмотрено влияние вибрационных воздействий и ударных нагрузок на рабочие поверхности контактирующие пары узлов раскрытия при выведении КА на околоземную орбиту. Выявлено, что из всех видов динамических нагрузок, действующих на изделие, вибрация является самым опасным.
2. Разработана конструкция образцов пластин с МДО-покрытием и воздействующих на них упоров.
3. Разработано приспособление, закрепляющееся на вибростенде, для моделирования воздействий на контактирующую пару. Для анализа частотных характеристик приспособления и определения предварительного усилия на сферическом упоре разработана расчетная модель в программе ANSYS с использованием метода конечных элементов. Подобраны значения задаваемых режимов вибронагружения, эквивалентные возникающим при выведении ракетой-носителем.
4. Подобраны и отработаны на вибростенде режимы вибрационных воздействий на контактную пару «упор-площадка», имитирующие режимы при выведении КА.
5. На основании анализа физических процессов, происходящих в контактных парах при виброударных и других видах внешних воздействий выдвинута

гипотеза, что процесс взаимного воздействия при нагрузках, аналогичных режиму выведения КА, состоит из трех последовательных стадий:

Фреттинг-износ → микроударное воздействие → микроударное воздействие + трение.

6. Выведена формула площади адгезионного контакта:

$$S_{\text{адг}} = \pi (L^2/4 + h^2) - \frac{\pi L^2}{4} = \pi h^2,$$

где

L – хорда окружности радиусом r (радиус сферы упора);

h – глубина внедрения упора в пластину.

Из данной формулы следует, что для снижения адгезии контактирующих поверхностей важно максимально снизить глубину износа поверхности площадки, на которую воздействует упор.

7. Предложено математическое описание для случая микроударного воздействия сферического упора на образец с МДО-покрытием, учитывающая современные подходы к описанию процесса трещинообразования в керамических материалах.

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

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.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТОЙКОСТИ К ВОЗДЕЙСТВИЮ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА СВОЙСТВА И СТРУКТУРУ МДО-ПОКРЫТИЯ В ЗОНЕ КОНТАКТА ЭЛЕМЕНТОВ РАСКРЫТИЯ КА

После проведения вибродинамических испытаний на виброкомплексе V984LS проведены съемки профилограмм зон износа на микроскопе Keyence серии VK-X100 и фотографирование зон износа с большим разрешением. Ниже приведены результаты исследований зон износа образцов и воздействующих на них сферических упоров.

4.1 Влияние физических характеристик материала основы МДО-покрытий на величину износа образца

В Таблице 12 приведены результаты износа пластин с МДО-покрытиями на основах из сплавов АМг6.М, 01570, Д16.А.Т в зависимости от твердости основы [145, 146].

Таблица 12.

Величина твёрдости и средняя глубина износа на экспериментальных образцах с МДО-покрытием

| Материал основы (подложки) | Твердость, НВ | Средняя 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 |

Примечание - погрешность толщины МДО-покрытия образца 5 мкм.

На Рисунках 4.1-4.9 приведены профилограммы износа поверхностей, снятые при помощи микроскопа Keyence. Профилограммы зон износа позволяют не только численно оценить глубину износа, но и по картине зоны износа оценить интенсивность разрушения МДО-покрытия.

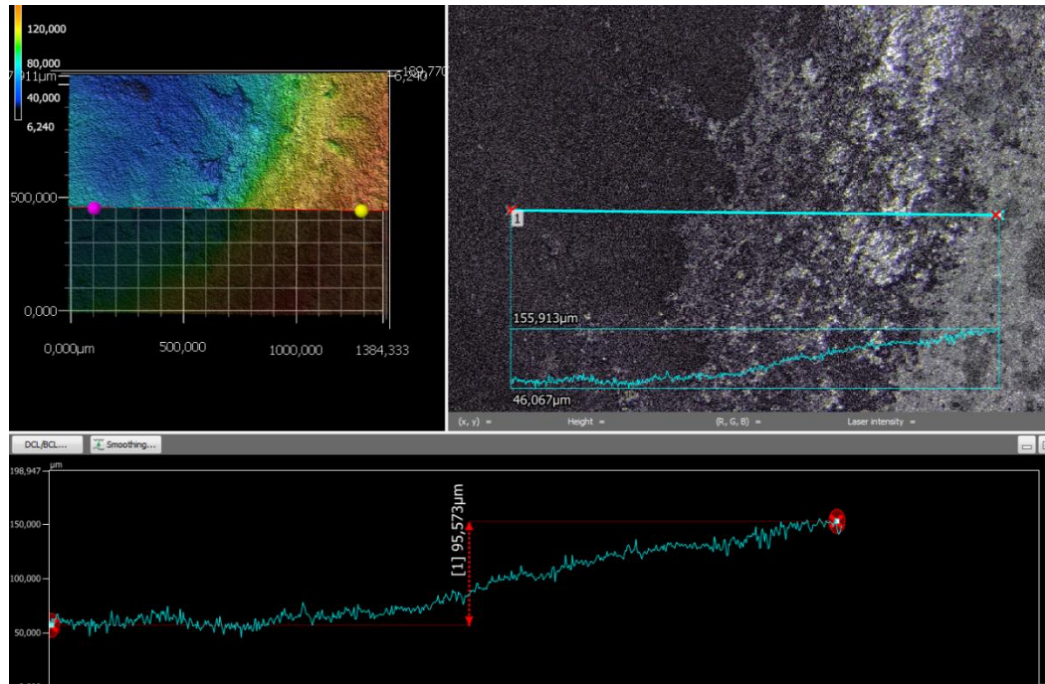


Рисунок 4.1.

Профилограмма зоны износа. Сплав АМГ6.М, толщина покрытия 50 мкм

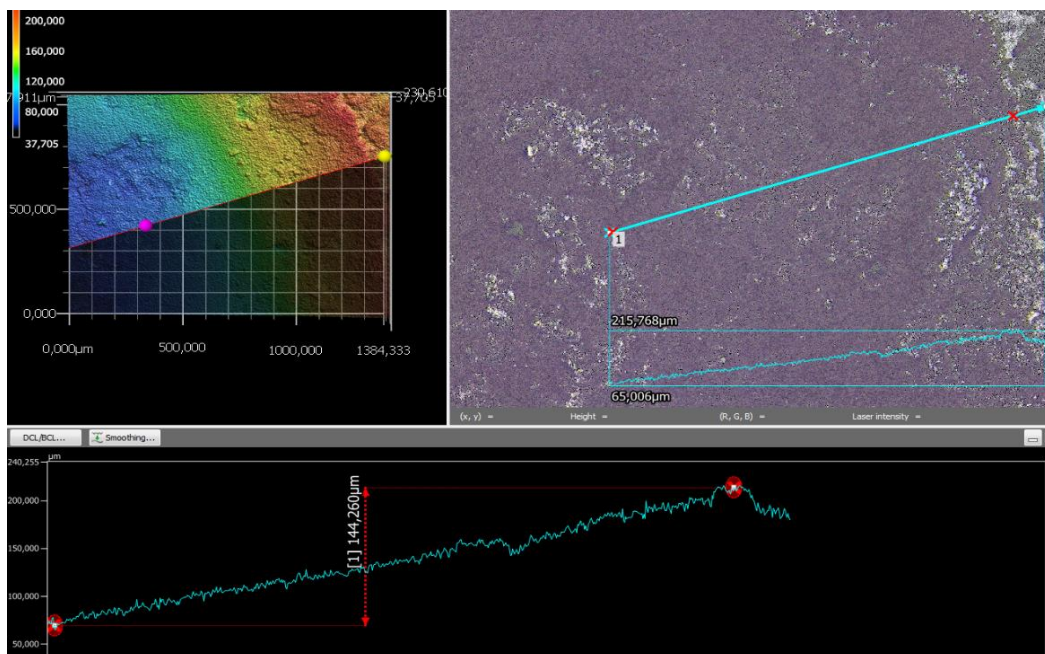


Рисунок 4.2.

Профилограмма зоны износа. Сплав 01570, толщина покрытия 50 мкм

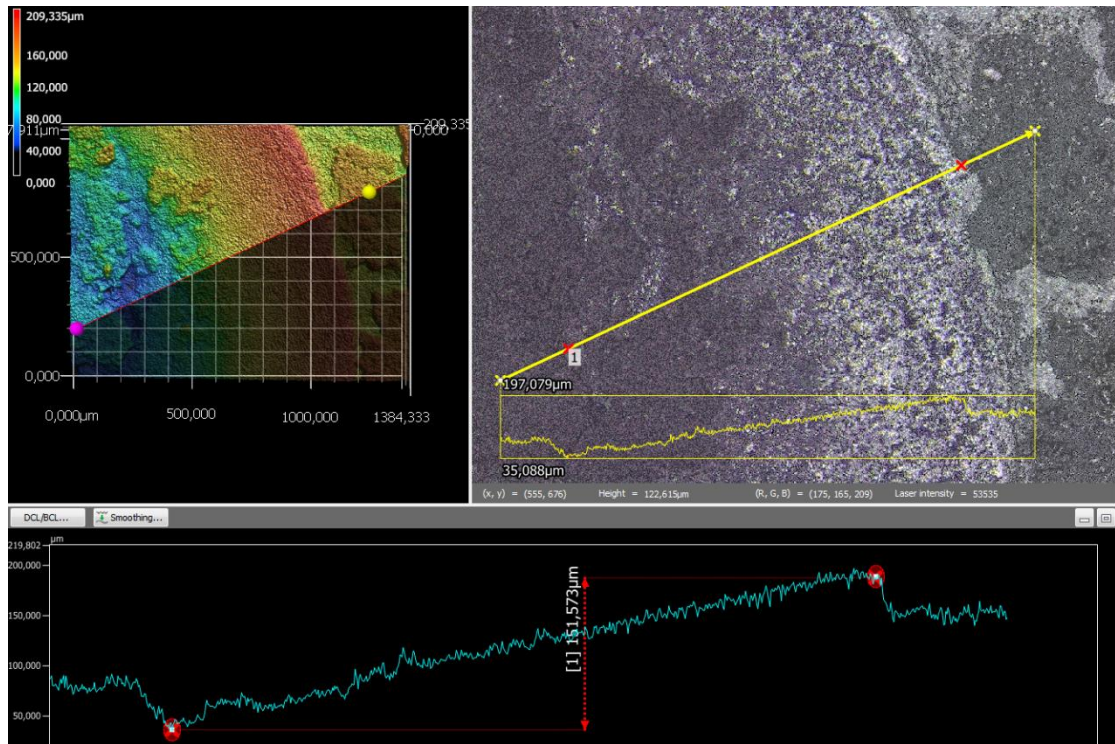


Рисунок 4.3.

Профилограмма зоны износа. Сплав Д16.А.Т, толщина покрытия 50 мкм

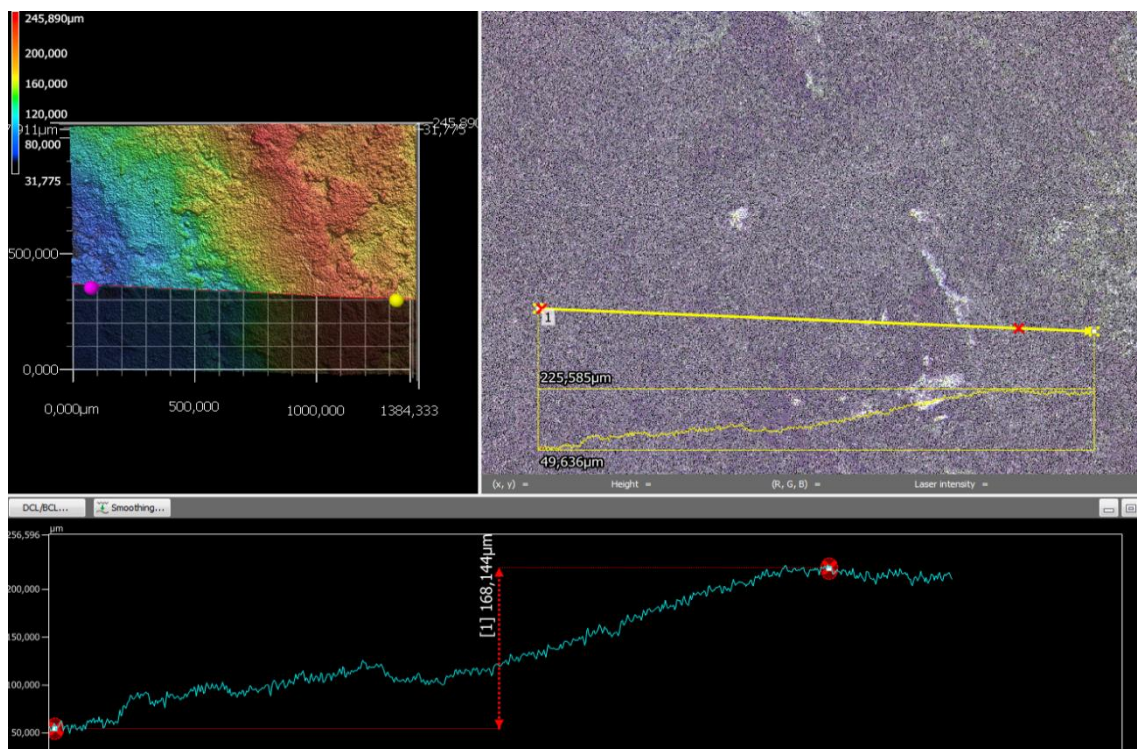


Рисунок 4.4.

Профилограмма зоны износа. Сплав АМг6.М, толщина покрытия 100 мкм

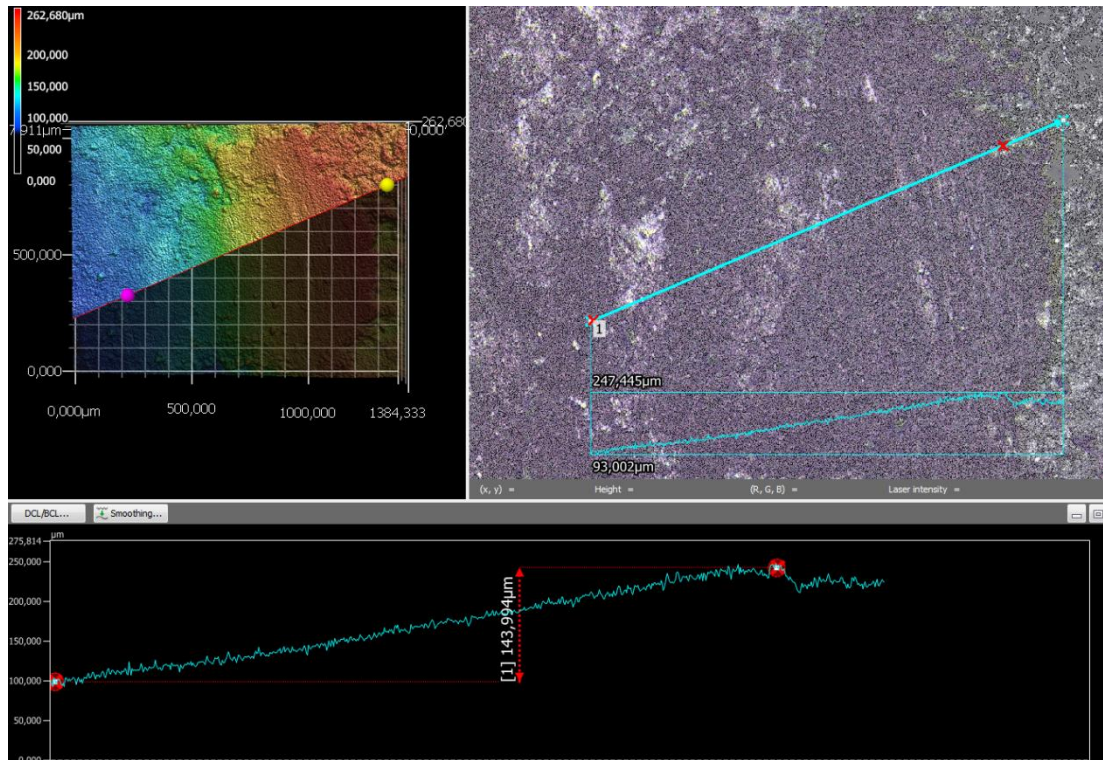


Рисунок 4.5.

Профилограмма зоны износа. Сплав 01570, толщина покрытия 100 мкм

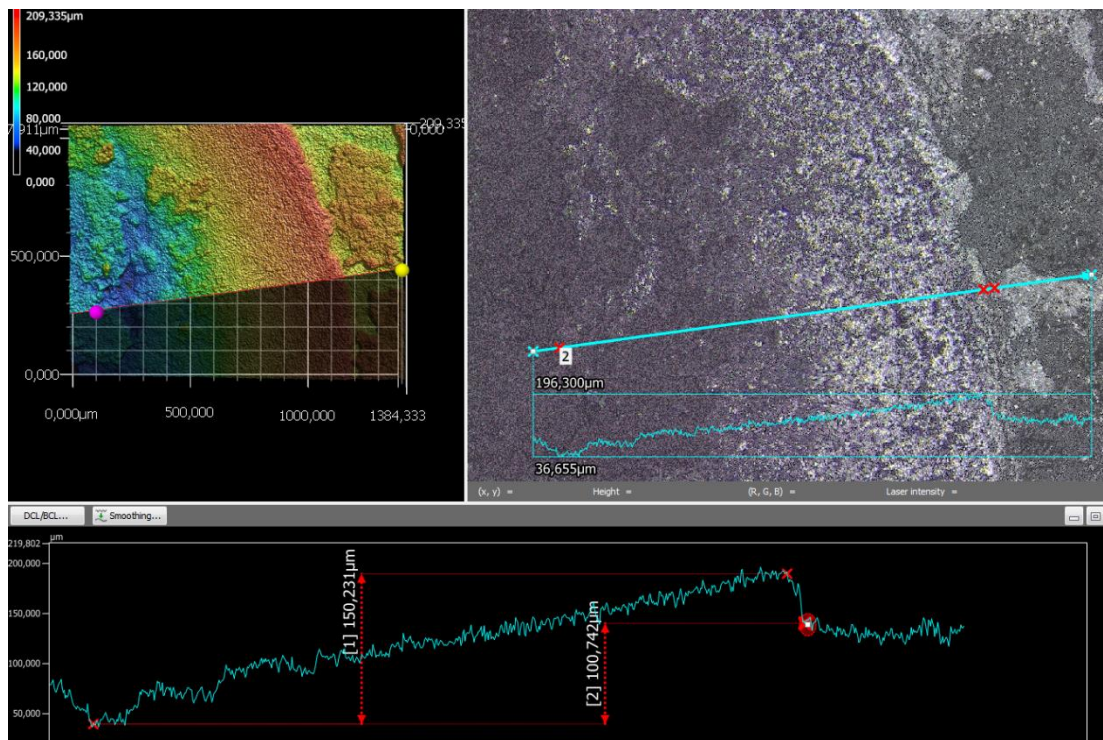


Рисунок 4.6.

Профилограмма зоны износа. Сплав Д16.А.Т, толщина покрытия 100 мкм

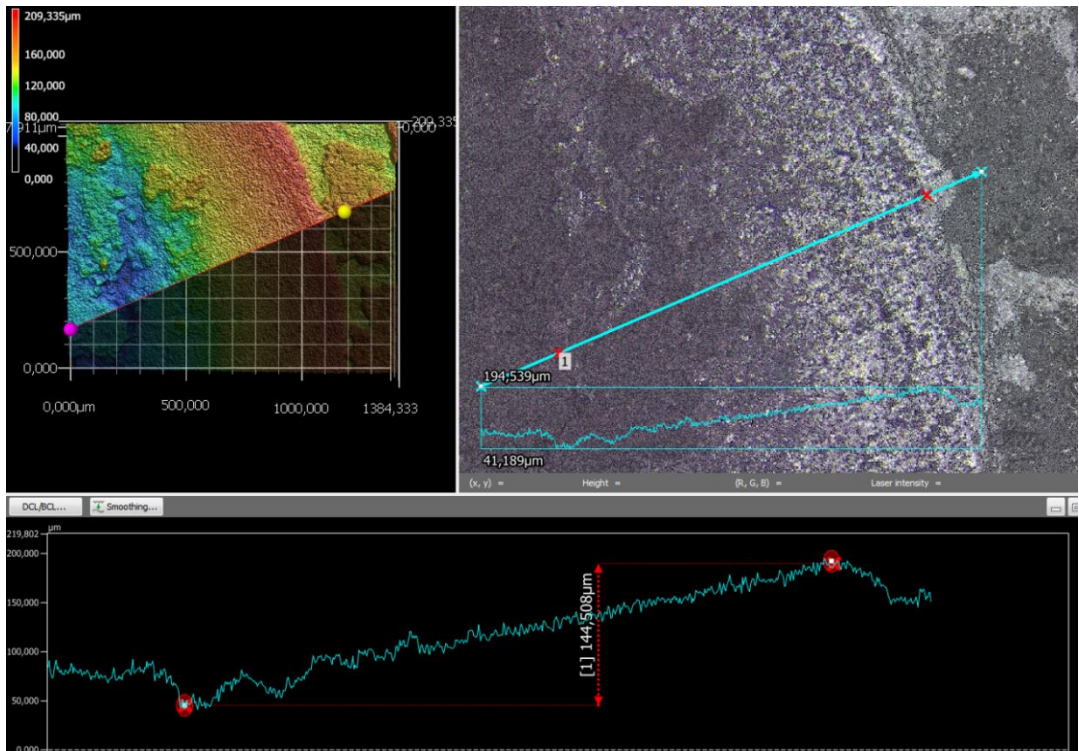


Рисунок 4.7.

Профилограмма зоны износа. Сплав АМг6.М, толщина покрытия 150 мкм

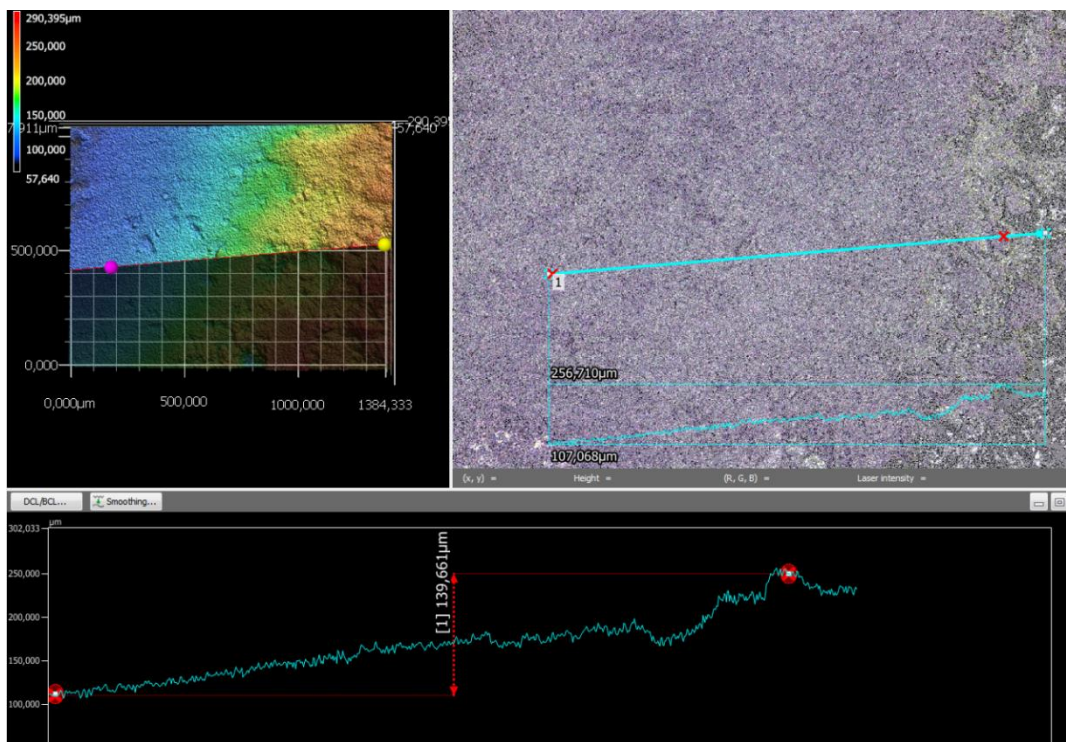


Рисунок 4.8.

Профилограмма зоны износа. Сплав 01570, толщина покрытия 150 мкм

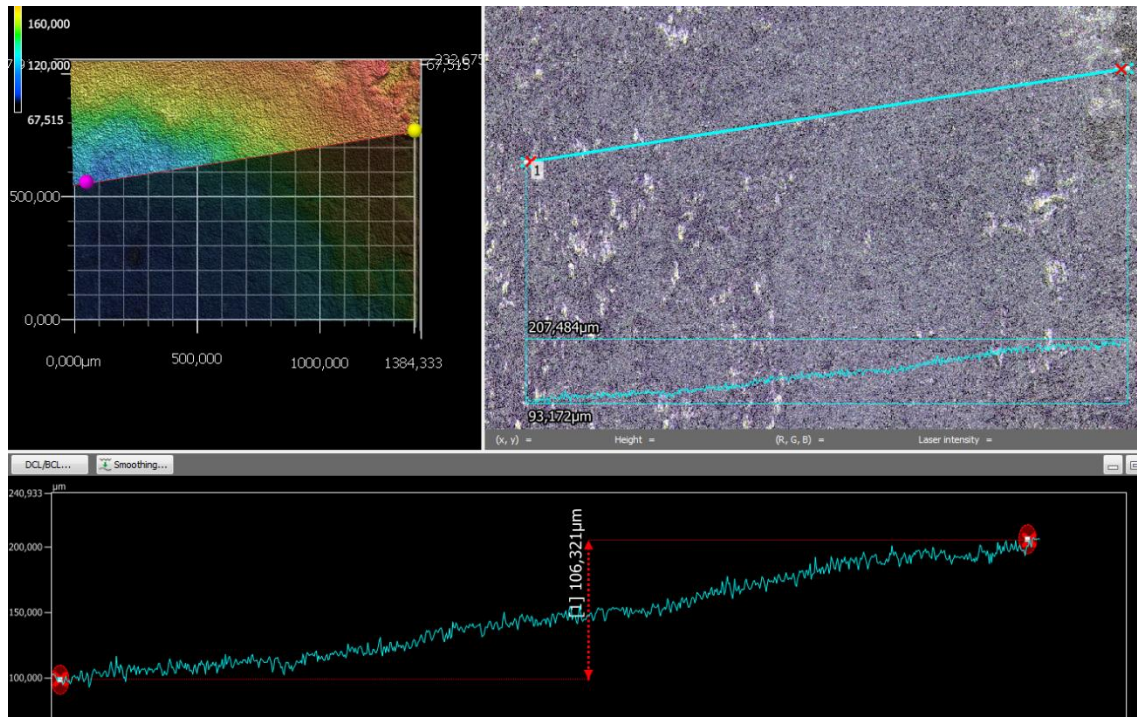


Рисунок 4.9.

Профилограмма зоны износа. Сплав Д16.А.Т, толщина покрытия 150 мкм

На основании данных о глубине износа экспериментального образца, полученных из анализа профилограмм, построены графики зависимости величины износа от твердости образца для толщин МДО-покрытий 50 мкм, 100 мкм, 150 мкм (на Рисунках 4.10-4.12).

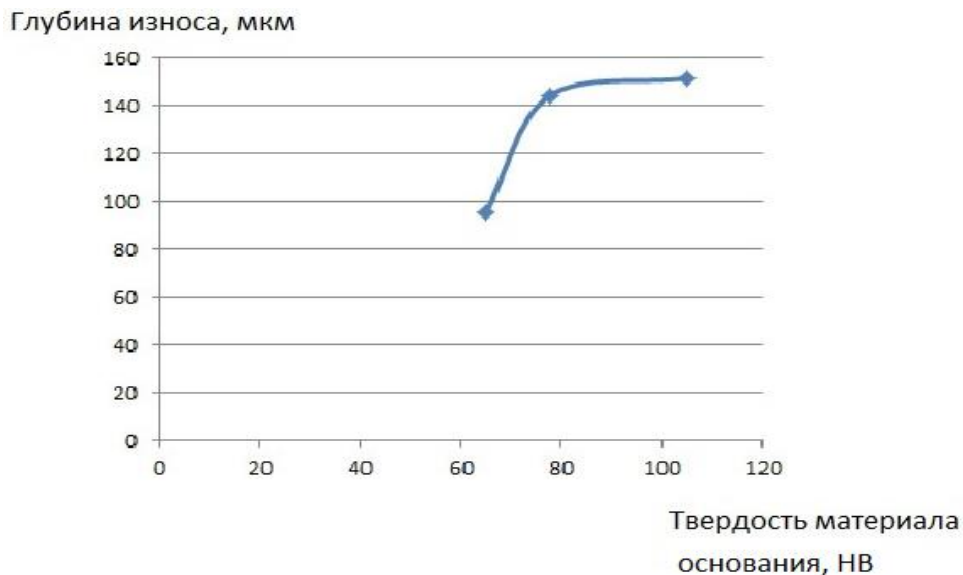


Рисунок 4.10.

График зависимости величины износа от твердости материала основы (подложки) образца с МДО-покрытием 50 мкм

Глубина износа, мкм

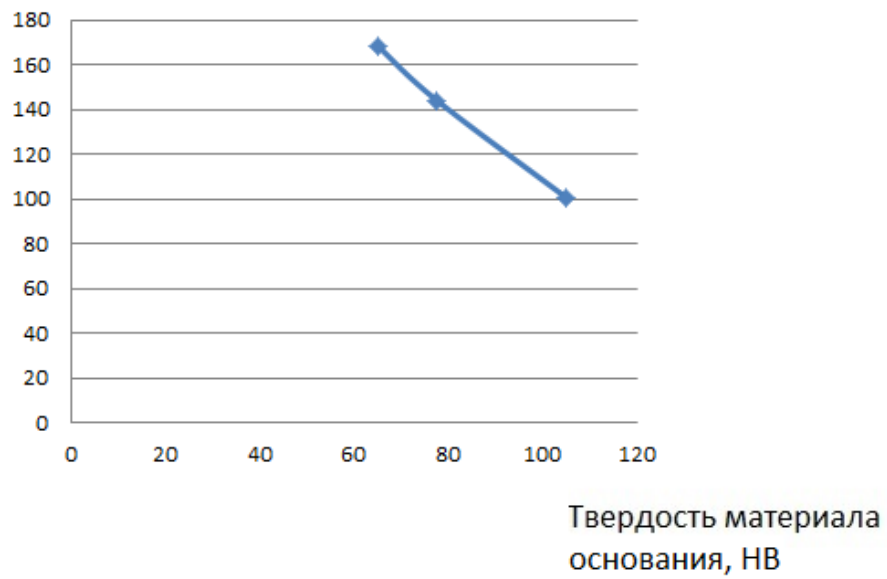


Рисунок 4.11.

График зависимости величины износа от твердости материала основы (подложки) образца с МДО-покрытием 100 мкм

Глубина износа, мкм

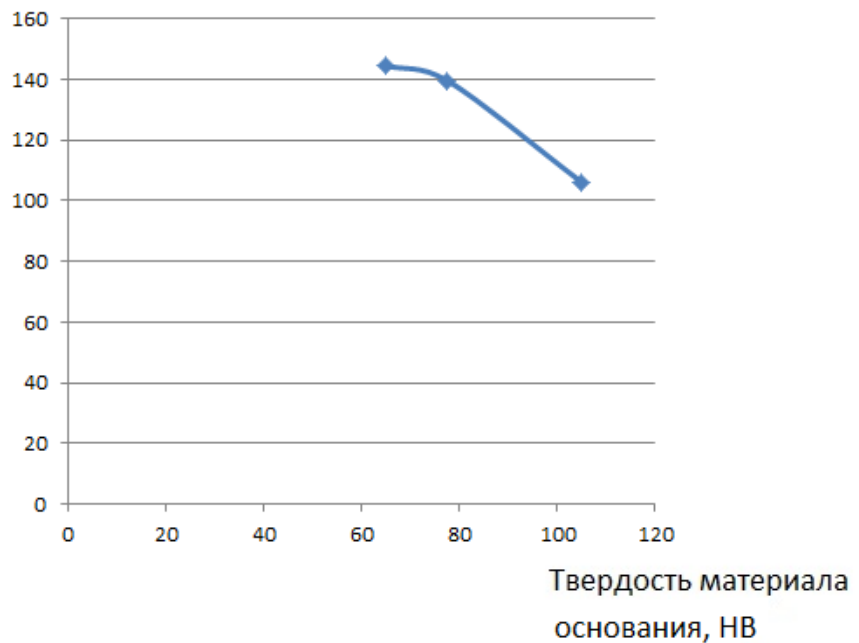


Рисунок 4.12.

График зависимости величины износа от твердости материала основы (подложки) образца с МДО-покрытием 150 мкм

Анализ графиков износа позволяет сделать вывод о том, что тонкие МДО-покрытия (менее 100 мкм) не вносят вклада в защиту образца от износа. Это связано, главным образом, с тем, что при малых толщинах МДО-покрытий формируется технологический слой, состоящий из γ -фазы оксида алюминия, и практически не образуется слоя корунда (α -фазы оксида алюминия), по своей твердости превосходящего твердость материала основы. Величина износа образца в данном случае пропорциональна величине твердости материала, из которого он изготовлен. Причем, «вмивание» ядра (состоящего из разрушенного технологического слоя оксида) в металл возможно для материала с меньшей твердостью, с возрастанием твердости остатки разрушенного оксида начинают вести себя как абразивные частицы, увеличивая износ. Качественно происходящие процессы согласуются с данными графика распределения твердости, пористости и структуры по толщине оксидного покрытия (Рисунок 4.13).

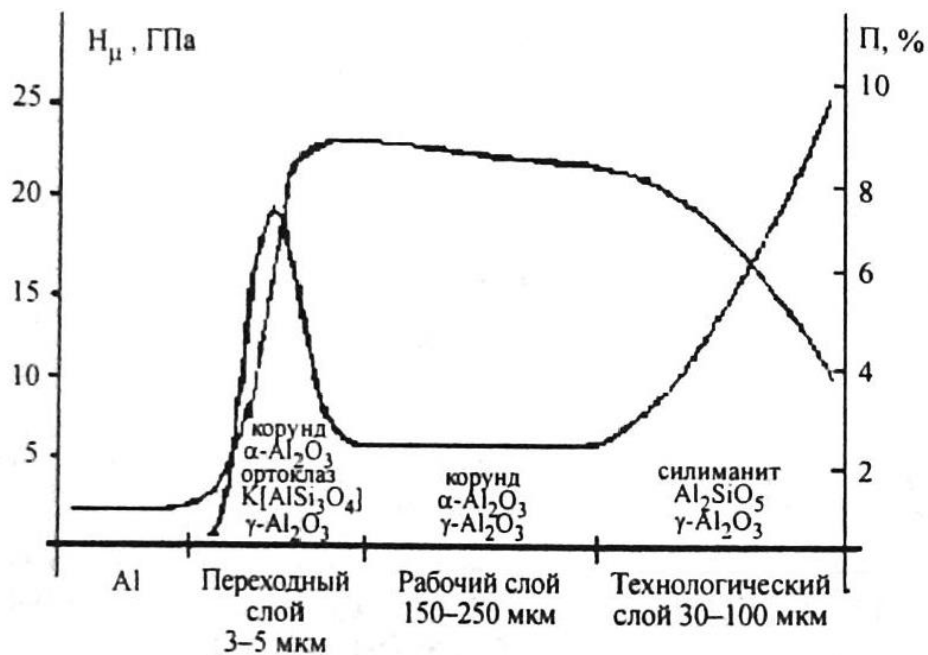


Рисунок 4.13.

Зависимость распределения твердости, пористости и структуры по толщине МДО-покрытия на алюминиевом сплаве [147]

Проанализировав вид графиков на Рисунках 4.10-4.12, можно найти с помощью метода наименьших квадратов уравнения квадратичной регрессии и построить графики уравнения регрессии для этих случаев (Рисунки 4.14-4.16).

Уравнение квадратичной регрессии для случая износа образца с толщиной МДО-покрытия 50 мкм будет иметь вид:

$$\hat{y} = -0,0272 \cdot x^2 + 5,2377 \cdot x - 98,2595 \quad (4.1)$$

Уравнение квадратичной регрессии для случая износа образца с толщиной МДО-покрытия 100 мкм будет иметь вид:

$$\hat{y} = 0,009 \cdot x^2 - 3,2293 \cdot x + 340,1504 \quad (4.2)$$

Уравнение квадратичной регрессии для случая износа образца с толщиной МДО-покрытия 150 мкм будет иметь вид:

$$\hat{y} = -0,0208 \cdot x^2 + 2,5818 \cdot x + 64,5838 \quad (4.3)$$

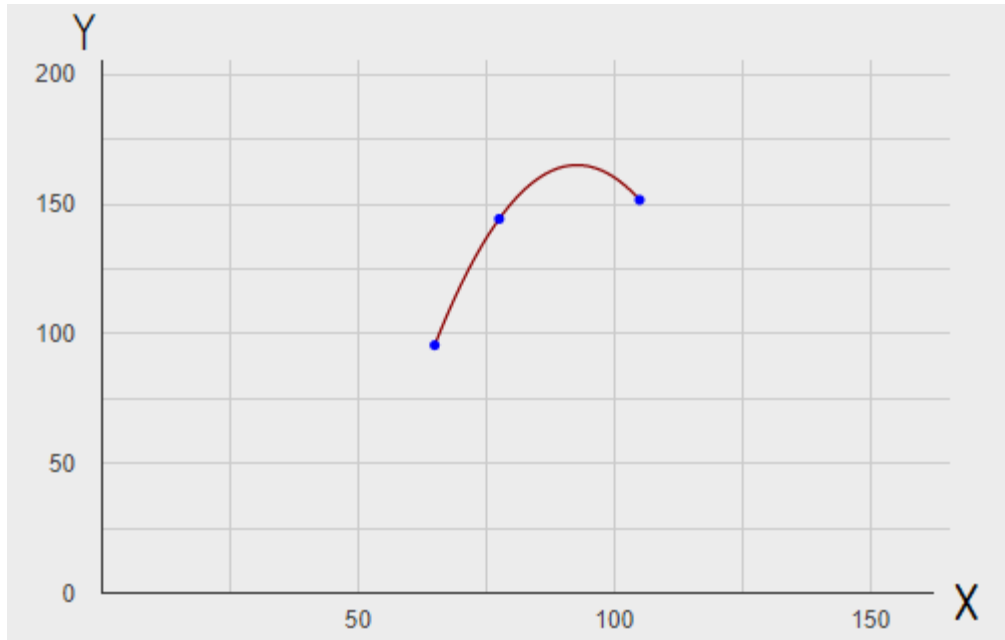


Рисунок 4.14.

График уравнения квадратичной регрессии для случая износа образца с толщиной МДО-покрытия 50 мкм

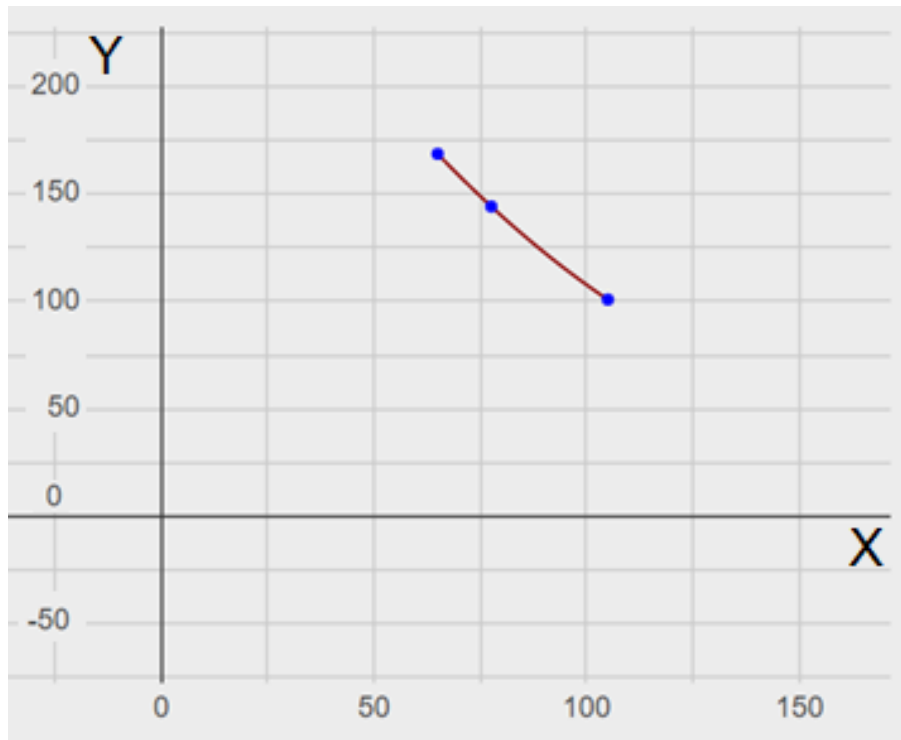


Рисунок 4.15.

График уравнения квадратичной регрессии для случая износа образца с толщиной МДО-покрытия 100 мкм

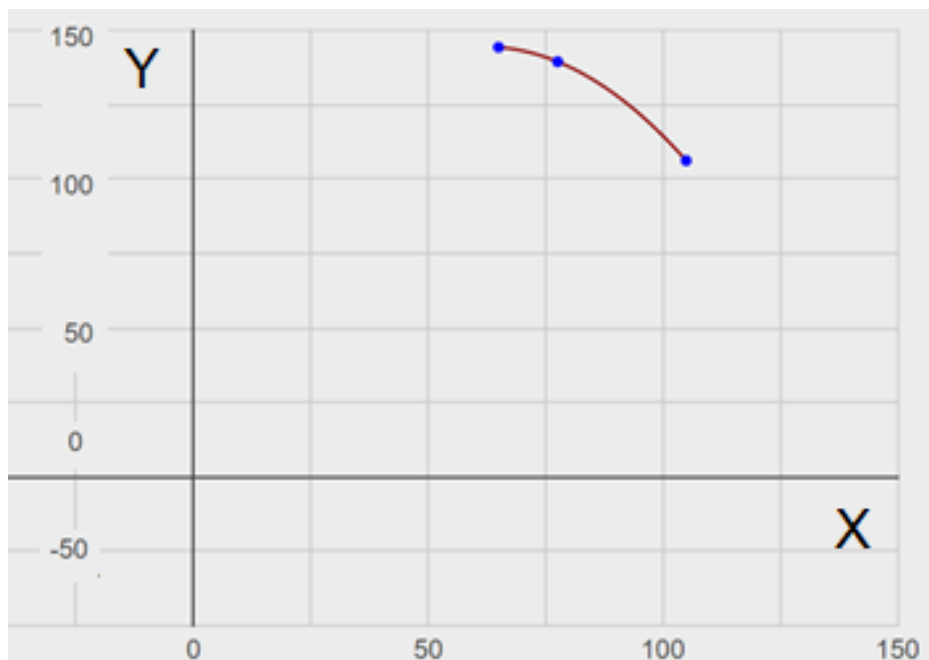


Рисунок 4.16.

График уравнения квадратичной регрессии для случая износа образца с толщиной МДО-покрытия 150 мкм

Анализируя полученные результаты, можно выдвинуть гипотезу о том, что сформированный корундовый слой МДО-покрытия при воздействии на него сферическим упором начинает проявлять упругие мембранные свойства. При воздействии на экспериментальный образец импульс передается через МДО-покрытие без демпфирования к материалу основы. При определённой величине усилия происходит разрушение МДО-покрытия и вдавливание ядра (состоящего из разрушенного покрытия) в материал основы. В случае более твёрдого материала, такого как Д16.А.Т, основа противостоит ударному импульсу, и МДО-покрытие, имеющее твердость выше, чем у материала основы, вносит вклад в формирование свойств экспериментального образца по сопротивлению ударным и фреттинг-нагрузкам.

Учитывая влияние характеристик материала основы (положки) на разрушение образца, введем в уравнение 3.29 эмпирический 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.

$$h = \left(r - \sqrt{r^2 - \frac{3YP_{\Sigma}\sqrt{1-(1-\theta_0)}\exp(-e_c)}{2\pi\cdot(1-\theta_0)\exp(-e_c)}\frac{3}{2}} \right) \cdot M \quad (4.4)$$

Теоретические значения коэффициента M , рассчитанные по уравнению 3.28 с учетом накопленного среднего квадратичного значения усилия выведенного в разделе 3.2, для рассматриваемых экспериментальных случаев с толщиной МДО-слоя 100 мкм приведены в таблице 13.

Таблица 13.

Теоретические значения коэффициента M

| Материал основы | АМг6.М | 01570 | Д16.А.Т |
|--|--------|-------|---------|
| Значение коэффициента M (теоретические) | 21 | 18 | 12,5 |

4.2 Влияние толщины МДО-покрытия на величину износа образца

Анализ данных, приведенных в разделе 4.1, свидетельствует, что наименьший износ экспериментальных образцов демонстрируется на образце из сплава Д16.А.Т с применением МДО-покрытия. Для выявления граничных условий и экстремумов проведены исследования дополнительных образцов из сплава Д16.А.Т с большей дискретностью толщин МДО-покрытий. Данные по толщине МДО-покрытий и глубине износа экспериментального образца приведены в Таблице 14.

Таблица 14.

Данные по толщине МДО-покрытий и средней глубины износа экспериментальных образцов из сплава Д16.А.Т.

| | | | | | | |
|--------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Толщина слоя МДО-покрытия, мкм | 35 | 50 | 100 | 120 | 150 | 225 |
| Средняя глубина износа образцов, мкм | 146 | 151 | 100 | 74 | 106 | 236 |

Обобщив результаты экспериментальной отработки образцов (Таблица 13), можно построить график зависимости глубины износа экспериментального образца от толщины МДО-покрытия (Рисунок 4.17). Анализируя данный график, можно выделить условно 3 основные области разрушения покрытия и износа экспериментального образца:

1. В зоне АБ покрытие не имеет достаточного слоя корунда (α -фазы оксида алюминия), и МДО-покрытие не вносит вклада в формирование защитных свойств экспериментального образца. Непрочный 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 сферического упора. Этим объясняется рост глубины износа на участке АВ (Рисунок 4.17) по сравнению с материалом без покрытия.

2. С увеличением толщины МДО-покрытия и, как следствие, увеличением слоя корунда в покрытии (зона БВ, Рисунок 4.17), происходит увеличение эффективности защитных свойств, о чём свидетельствует снижение глубины износа экспериментального образца.

3. После формирования определенной толщины покрытия оно перестает проявлять упругие мембранные свойства и передавать полный моментный импульс к материалу подложки (зона ВГ, Рисунок 4.17). Вследствие этого происходит интенсивное образование медианных и боковых трещин в покрытии между соседними порами, и начинается выкрашивание. С ростом толщины покрытия растет и величина износа, т. к. вследствие выкрашивания толстого покрытия растет амплитуда ударного воздействия со стороны сферы-упора. Эти данные согласуются с полученными ранее результатами разрушения толстых МДО-покрытий, сформированных на сплаве АМгб.М (Рисунок 4.18). Таким образом, гипотеза о стадиях износа образца с МДО-покрытием, выдвинутая в Главе 3, находит экспериментальное подтверждение, и характер разрушения соответствует уравнению 4.4.

Кривая БВГ представляет наибольший практический интерес, т. к. позволяет по положению точки экстремума найти толщину МДО-покрытия на алюминированном, наилучшим образом предотвращающую износ. В физическом плане – это точка перехода к интенсивному образованию боковых трещин, характеризующаяся значением коэффициента $K > 1$ в уравнении 4.4.

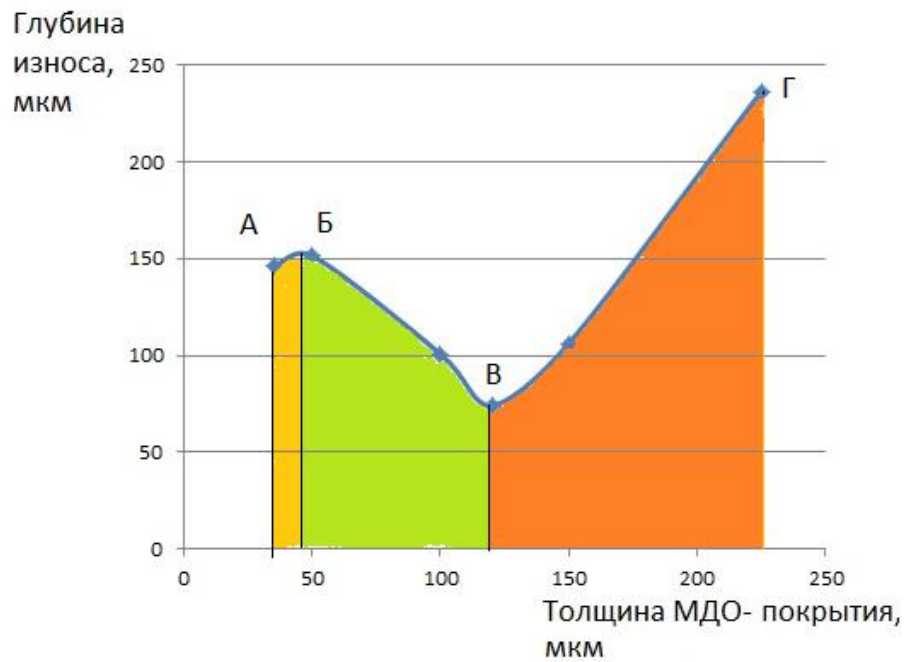


Рисунок 4.17.

График зависимости глубины износа экспериментального образца от толщины МДО-покрытия на основе (подложке) из сплава Д16.А.Т



Рисунок 4.18.

Зона разрушения МДО-слоя толщиной 260-275 мкм, сформированного на поверхности пластины из алюминиевого сплава АМг6.М, после виброиспытаний [29].

Для поиска оптимальной толщины МДО-покрытия используем аппроксимацию данных эксперимента методом наименьших квадратов уравнения

квадратичной (4.5) и кубической регрессии (4.6) и проанализируем диаграммы рассеивания (Рисунки 4.19, 4.20):

Для квадратичной регрессии уравнение будет иметь вид:

$$y=0,0134 \cdot x^2-3,2024 \cdot x+278,7065, \quad (4.5)$$

где

y – глубина износа экспериментального образца;

x – толщина МДО-покрытия.

Диаграмма рассеивания для квадратичной регрессии представлена на Рисунке 4.19.

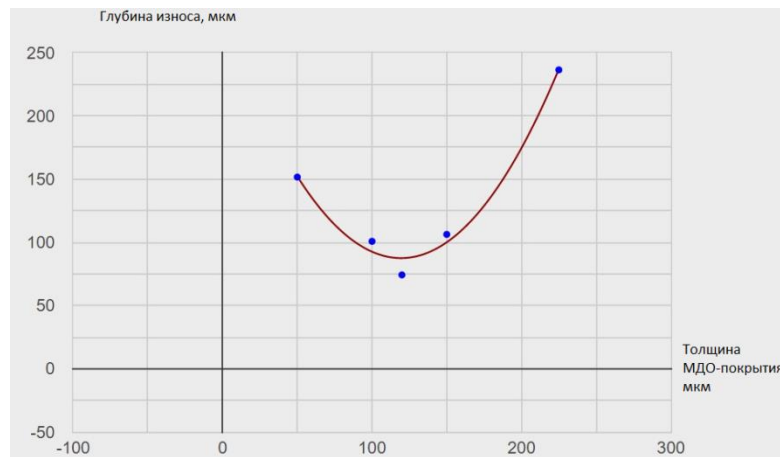


Рисунок 4.19.

Диаграмма рассеивания квадратичной регрессии для кривой БВГ графика износа образца из сплава Д16.А.Т с МДО-покрытием (Рисунок 4.17)

Для нахождения точки экстремума необходимо взять первую производную от найденной функции (4.6) приведенной ниже:

$$y'=0,0134 \cdot x^2-3,2024 \cdot x+278,7065 \quad (4.6)$$

Приравняв значение первой производной к нулю, найдём оптимальную толщину покрытия для износа экспериментального образца.

$$(0,0134 \cdot x^2-3,2024 \cdot x+278,7065)' = 0,0268 \cdot x-3,2024$$

$$0,0268 \cdot x-3,2024=0$$

$$x=119.49$$

Для кубической регрессии уравнение будет иметь вид:

$$y=0.0004 \cdot x^3 - 0.0919 \cdot x^2 + 6.5131 \cdot x + 14.2715 \quad (4.7)$$

Диаграмма рассеивания для кубической регрессии представлена на Рисунке 4.20.

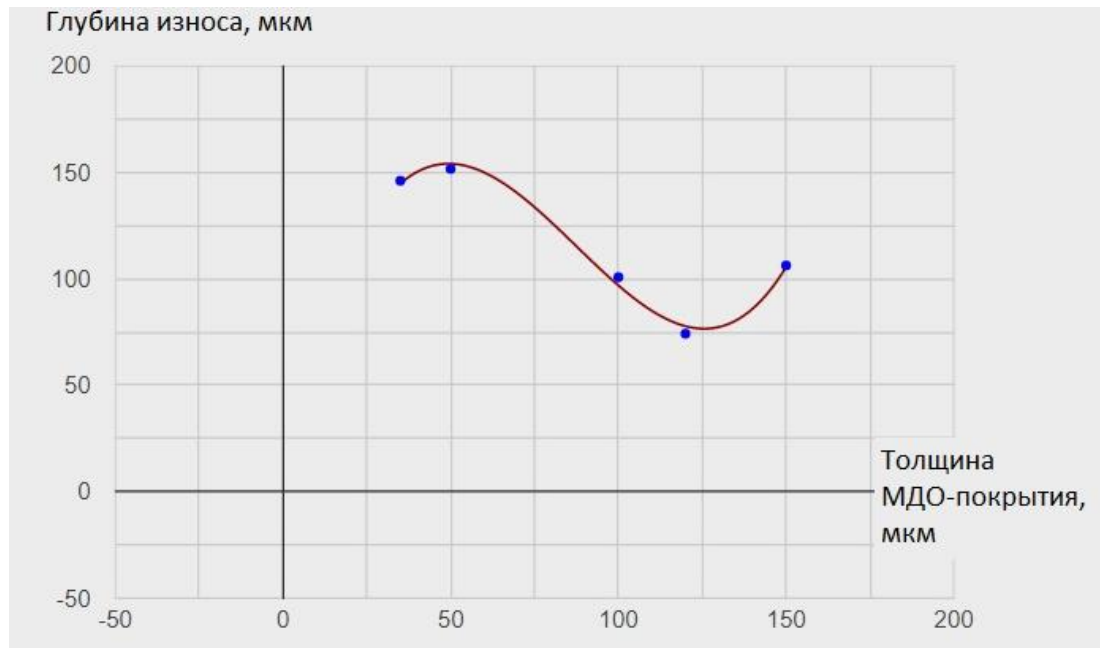


Рисунок 4.20.

Диаграмма рассеивания кубической регрессии для кривой БВГ графика износа образца из сплава Д16.А.Т с МДО-покрытием (Рисунок 4.17)

Приравняв значение первой производной к нулю, найдём оптимальную толщину покрытия для износа экспериментального образца.

$$(0.0004 \cdot x^3 - 0.0919 \cdot x^2 + 6.5131 \cdot x + 14.2715)' = (14.2715)' + (6.5131 \cdot x)' + (0.0004 \cdot x^3)' + (-0.0919 \cdot x^2)' = 0 + 6.51308 + 0.0011 \cdot x^2 + (-0.1838 \cdot x) = 0.0011 \cdot x^2 - 0.1838 \cdot x + 6.5131$$

$$0.0011x^2 - 0.1838x + 6.5131 = 0$$

Так как дискриминант больше нуля, то квадратное уравнение имеет два действительных корня:

$$x_1 \approx 51.0056$$

$$x_2 \approx 116.0853$$

Таким образом, при поиске оптимальной для снижения износа толщины МДО-покрытия на образце из сплава Д16.А.Т различными методами получаем величины 116,1 и 119,45 мкм соответственно, что составляет погрешность менее 5% относительно номинального результата эксперимента 120 мкм.

Для подтверждения общего для алюминиевых сплавов характера износа МДО-покрытия, построим аналогичную диаграмму рассеивания для экспериментального образца из сплава 01570 (Рисунок 4.21). На данной диаграмме наблюдаются схожие эффекты износа образца со смещением в сторону утолщения покрытия, что дает право предполагать общую физику износа образцов из различных алюминиевых сплавов с МДО-покрытиями.

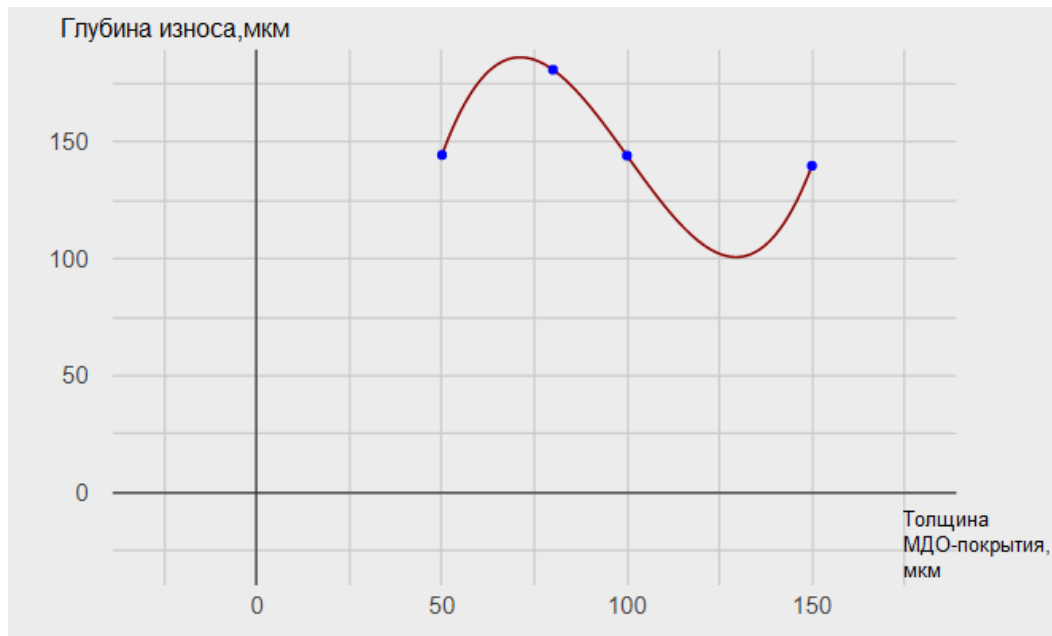


Рисунок 4.21.

Диаграмма рассеивания для кубической регрессии для кривой износа образца из сплава 01570 с МДО-покрытием

4.3 Влияние диаметра воздействующего упора на величину износа образца с МДО-покрытием

Учитывая оптимальные параметры по материалу основы экспериментального образца и толщине МДО-покрытия, для выявления зависимости величины износа экспериментального образца от диаметра

воздействующей сферы выбран вариант из сплава Д16.А.Т с толщиной МДО-покрытия 120 мкм, наиболее близкий по толщине к оптимальным значениям толщины покрытия, рассчитанным в разделе 4.2. Были изготовлены дополнительные упоры с диаметрами сферы 22, 25, 30 мм, согласно эскизам (Рисунки 4.22-4.24). Виброиспытания проводились на режимах, приведенных в разделе 3.4.

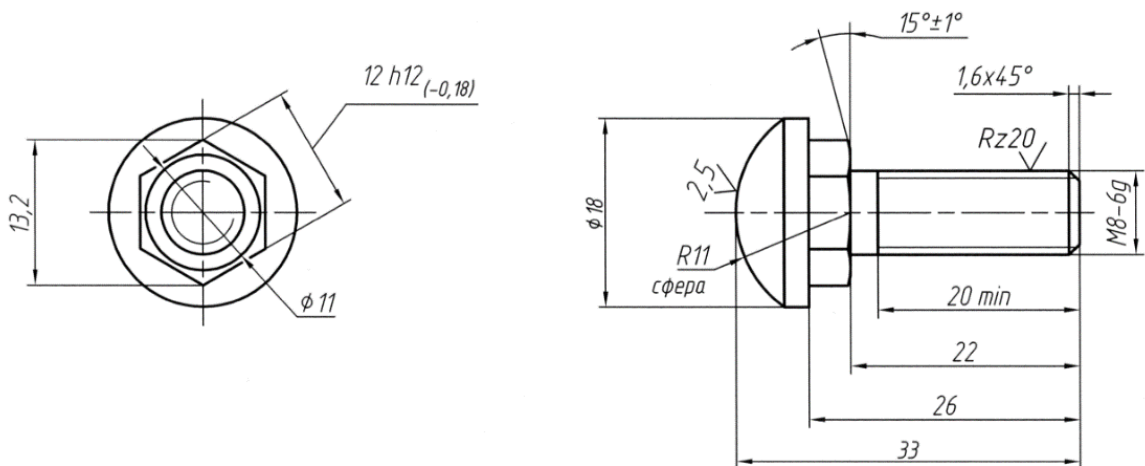


Рисунок 4.22.

Эскиз образца упора с диаметром воздействующей сферы 22 мм

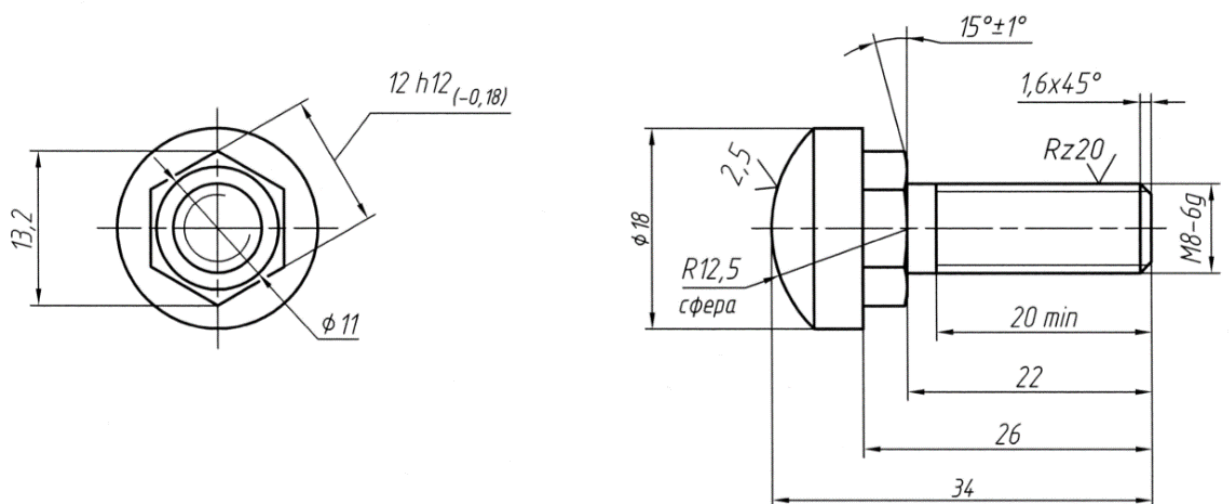


Рисунок 4.23.

Эскиз образца упора с диаметром воздействующей сферы 25 мм

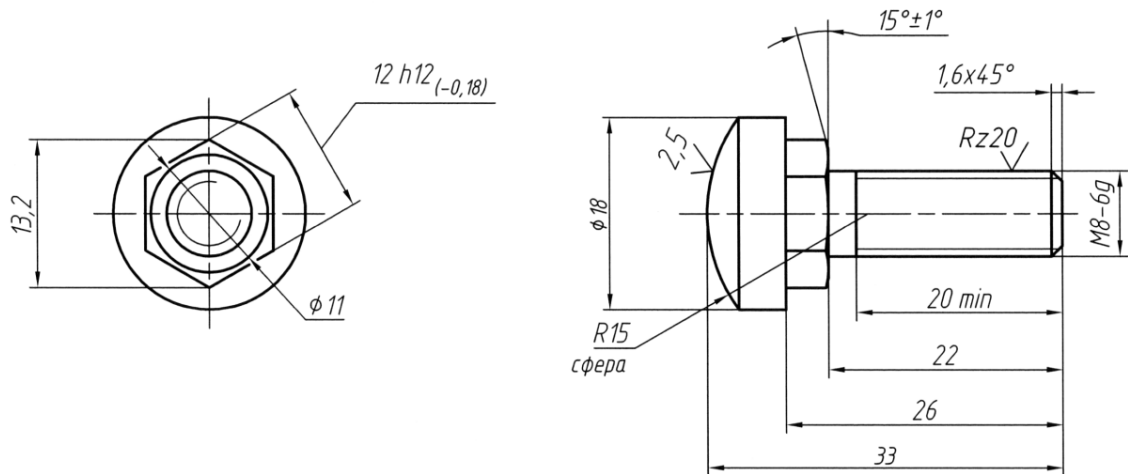


Рисунок 4.24.

Эскиз образца упора с диаметром воздействующей сферы 30 мм

По завершению виброиспытаний была проведена съемка зон износа образцов при помощи микроскопа Keyence. Результаты анализа профилограмм зон износа для каждого из образцов приведены в Таблице 15.

Таблица 15.

Глубина износа образца из сплава Д16.А.Т с МДО-покрытием толщиной 120 мкм при воздействии упоров с диаметрами сфер 18, 22, 25, 30 мм.

| Диаметр упора d, мм | 18 | 22 | 25 | 30 |
|---------------------------------------|--------|---------|---------|---------|
| Максимальная глубина износа S, мкм | 74,178 | 170,627 | 236,946 | 285,945 |

Полученные результаты позволяют провести аппроксимацию данных и вывести уравнение кубической регрессии.

$$y = -0.1805x^3 + 12.4449x^2 - 263.9542x + 1876.9744 \quad (4.8)$$

Диаграмма рассеяния для уравнения кубической регрессии приведена на Рисунке 4.25.

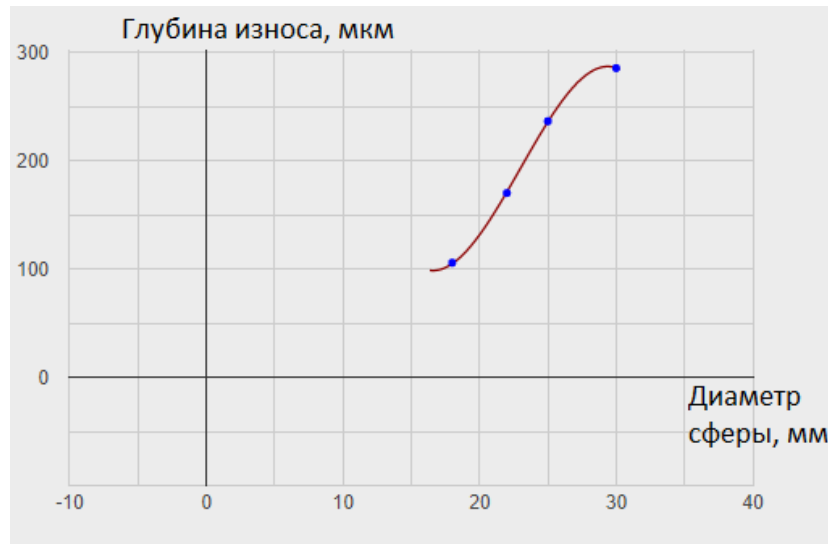


Рисунок 4.25.

Диаграмма рассеивания для кубической регрессии для кривой износа образца из сплава Д16.А.Т с МДО-покрытием толщиной 120 мкм при воздействии упоров с диаметрами сфер 18, 22, 25, 30 мм

На Рисунке 4.26 приведен график функции уравнения кубической регрессии на интервале диаметров сферы от 15 до 37 мм.

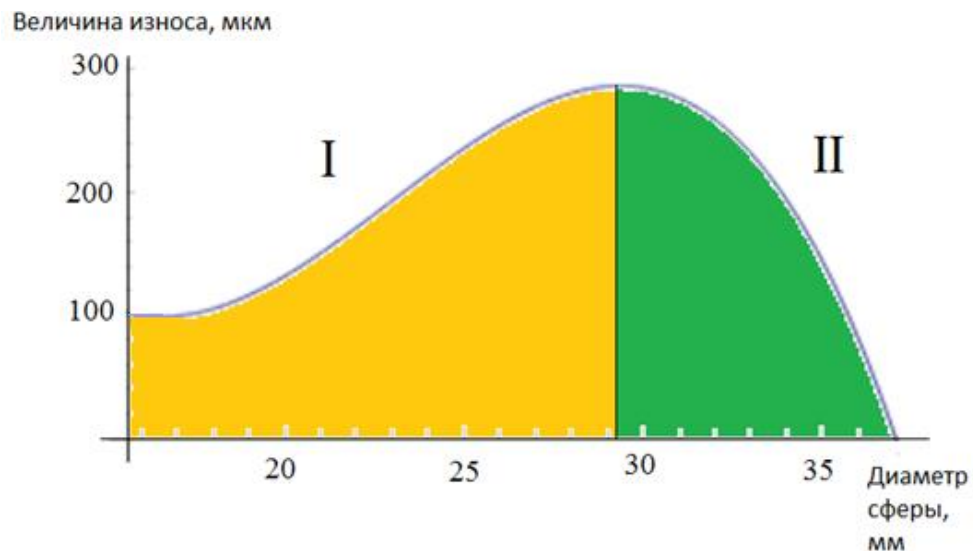


Рисунок 4.26.

График функции для уравнения кубической регрессии для кривой износа образца из сплава Д16.А.Т с МДО-покрытием толщиной 120 мкм при воздействии упоров с диаметрами сфер 18, 22, 25, 30 мм

В графике на Рисунке 4.26 условно можно выделить 2 области: I – рост износа при увеличении диаметра; II – снижение износа при дальнейшем увеличении диаметра. Возьмем производную функции износа и приравняем к нулю для поиска точек экстремума.

$$-0.5415 \cdot x^2 + 24.8898 \cdot x - 263.9542 = 0 \quad (4.9)$$

Найдем дискриминант квадратного уравнения

$$D = b^2 - 4ac = (24.8898)^2 - 4 \cdot 0.5415 \cdot 263.9542 = 619.50214404 - 571.7247972 = 47.77734684$$

Так как дискриминант больше нуля, то квадратное уравнение имеет два действительных корня:

$$x_1 = \frac{-24,8898 + \sqrt{47,7773}}{2 \cdot (-0,5415)} = 16,5999$$

$$x_2 = \frac{-24,8898 - \sqrt{47,7773}}{2 \cdot (-0,5415)} = 29,3646$$

Исходя из решения данного уравнения, можно сделать вывод, что оптимальный диаметр воздействующей сферы для снижения износа образца из сплава Д16.А.Т с МДО-покрытием – 16,6 мм.

Результаты эксперимента свидетельствуют о том, что при увеличении диаметра сферы, воздействующей на экспериментальный образец, в зоне I (Рисунок 4.26) растет глубина износа. Можно предположить, что при воздействии на твердый и пористый керамический слой МДО-покрытия сферой большего диаметра происходит интенсивный рост боковых трещин между соседними порами в МДО-покрытии. Последующее выкрашивание МДО-покрытия приводит к увеличению абразивного износа. Снижение износа в зоне II (Рисунок 4.26) связано со взаимным сочетанием разрушения МДО-покрытия и увеличением площади нагружения при воздействии на материал основы. Начиная с диаметра воздействующей сферы 30,346 мм, вклад в снижение износа от увеличения площади контакта оказывается больше, чем негативное влияние от роста боковых трещин.

4.4 Исследование морфологии контактной поверхности

Исследуя морфологию пятен контакта на образцах из сплавов АМг6.М, 01570, Д16.А.Т с толщиной МДО-покрытия 50 мкм и ответных упорах (Рисунок 4.27), наблюдаем схожая картина износа. Диаметр площади контакта 4,0-4,5 мкм. На образце из АМг6.М наблюдается металлический блеск, свидетельствующий о наличии контакта металл-металл в зоне соприкосновения. Так же блеск наблюдается на ответном упоре. Это свидетельствует о том, что при менее твердой основе образца не происходит «вминание» частиц разрушенного МДО-покрытия, и эти частицы начинают вести себя как абразивный материал. Морфология пятен контакта согласуется с данными о росте глубины износа на участке АБ графика износа образца Д16.А.Т (Рисунок 4.17).

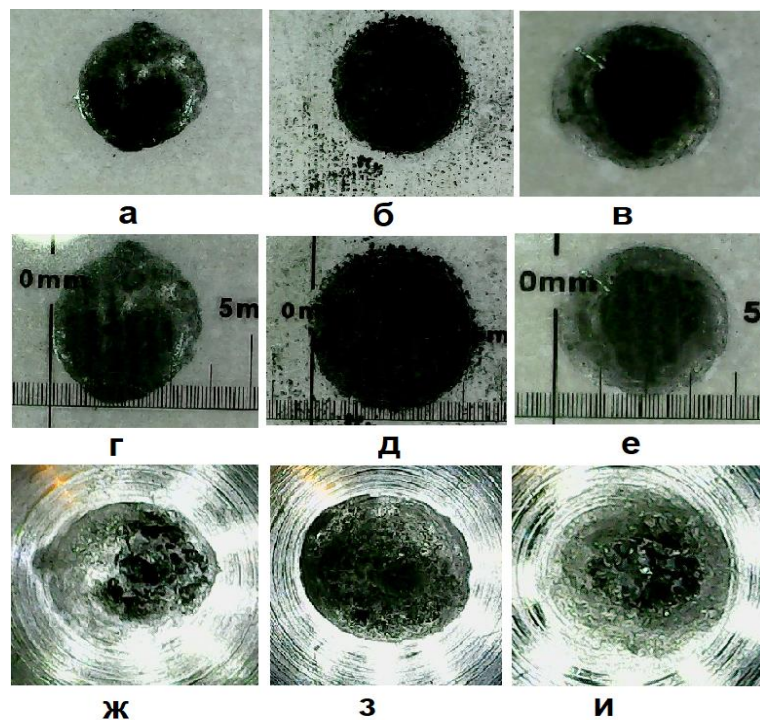


Рисунок 4.27.

Морфология пятен контакта на образцах из сплавов АМг6.М, 01570, Д16.А.Т с толщиной МДО-покрытия 50 мкм и ответных упорах:

а, г – пятно контакта образца из сплава АМг6.М,

б, д – пятно контакта образца из сплава 01570,

в, е – пятно контакта образца из сплава Д16.А.Т,

ж, з, и – пятна контакта на упорах, воздействующих на образцы из сплавов АМг6.М, 01570, Д16.А.Т соответственно.

Неравномерность распределения частиц износа по площади контакта упора свидетельствует о недостаточной толщине покрытия для защиты всей площади контакта и о неустойчивом процессе «налипания» частиц МДО-покрытия к металлу сферического упора. Вытянутая форма пятна контакта на упоре и характер износа поверхности свидетельствует о наличии фреттинг-износа в контактирующей паре.

На образцах из сплавов АМг6.М, 01570, Д16.А.Т с толщиной МДО-покрытия 100 мкм наблюдается блеск металла в значительно меньшей степени, чем на образцах с толщиной покрытия 50 мкм и имеет, как правило, случайный характер (Рисунок 4.28).

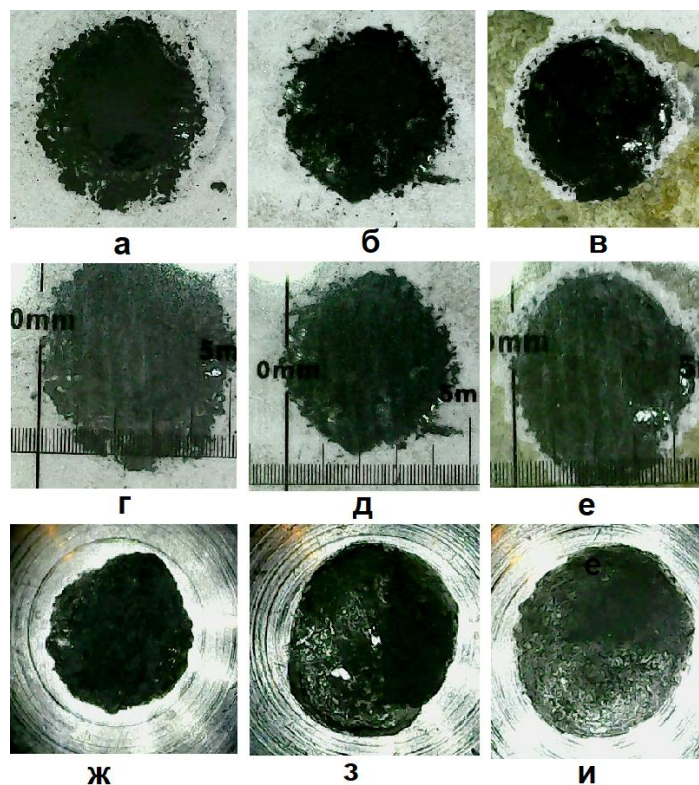


Рисунок 4.28.

Морфология пятен контакта на образцах из сплавов АМг6.М, 01570, Д16.А.Т с толщиной МДО-покрытия 100 мкм и ответных упорах:

а, г – пятно контакта образца из сплава АМг6.М,

б, д – пятно контакта образца из сплава 01570,

в, е – пятно контакта образца из сплава Д16.А.Т,

ж, з, и – пятна контакта на упорах, воздействующих на образцы из сплавов АМг6.М, 01570, Д16.А.Т соответственно.

Это свидетельствует о том, что происходил контакт металл-металл. В случае АМг6.М контакт металл-металл с поверхностью упора сместился на периферию пятна контакта. Следовательно, в центральной области контакта образуется достаточное количество частиц износа МДО-покрытия для предотвращения контакта металл-металл. Помимо этого, выявлена неоднородность частиц МДО-покрытия в процессе «налипания» к металлу сферического упора. Вытянутая форма пятна контакта на упоре свидетельствует о наличии фреттинг-износа в контактирующей паре. Морфология износа упора свидетельствует о сочетании фреттинга и абразивного износа

На образцах из сплавов АМг6.М, 01570, Д16.А.Т с толщиной МДО-покрытия 150 мкм наблюдается различная картина в зонах износа (Рисунок 4.29).

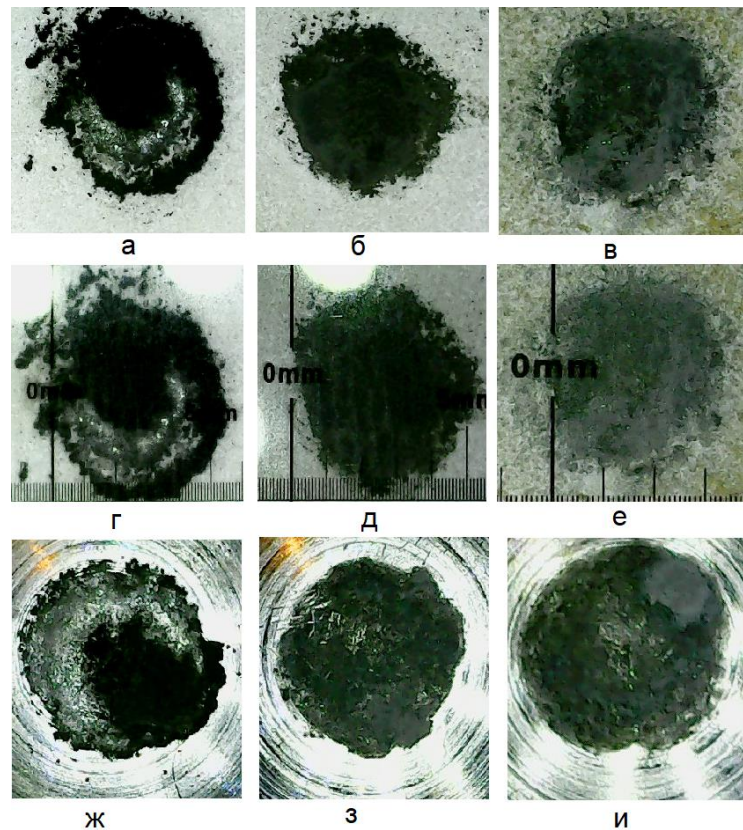


Рисунок 4.29.

Морфология пятен контакта на образцах из алюминиевых сплавов АМг6.М, 01570, Д16.А.Т с толщиной МДО-покрытия 150 мкм и ответных упорах:
 а, г – пятно контакта образца из сплава АМг6.М,
 б, д – пятно контакта образца из сплава 01570,
 в, е – пятно контакта образца из сплава Д16.А.Т,
 ж, з, и – пятна контакта на упорах, воздействующих на образцы из сплавов АМг6.М, 01570, Д16.А.Т соответственно.

На образце из сплава АМгб.М виден металлический блеск более чем на 40 % площади. На сферическом упоре, воздействующем на образец из сплава АМгб.М, наблюдается металлический блеск на аналогичном участке пятна контакта, что свидетельствует о значительной площади контакта металл-металл. На образцах из сплавов 01570 и Д16.А.Т металлический блеск в пятнах контакта отсутствует. На ответных воздействующих сферических упорах металлического блеска практически не наблюдается. Данные наблюдения позволяют предположить значительную роль твёрдости материала основы в стабильном распределении продуктов износа МДО-покрытия по поверхности контакта взаимодействующих элементов. Пятна контакта на сферических упорах приближены к форме круга, следовательно, значительно снижена фреттингговая составляющая в износе поверхности по сравнению с вариантами МДО-покрытия 50 и 100 мкм. Можно сделать выводы о том, что с увеличением толщины покрытия растёт фреттингоустойчивость.

Подтверждением этого вывода служит морфологическая картина износа упора, контактировавшего с образцом из сплава Д16.А.Т толщиной 210 мкм, имеющего форму пятна контакта, приближающуюся к круглой (Рисунок 4.30).



Рисунок 4.30.

Морфологическая картина износа упора при взаимодействии с образцом из сплава Д16.А.Т с МДО-покрытием толщиной 120 мкм

На Рисунке 4.31 приведена фотосъёмка пятен контакта образцов из сплава Д16.А.Т с толщиной МДО-покрытия 120 мкм и соответствующих воздействующих сферических упоров диаметрами 18, 22, 25, 30 мм.

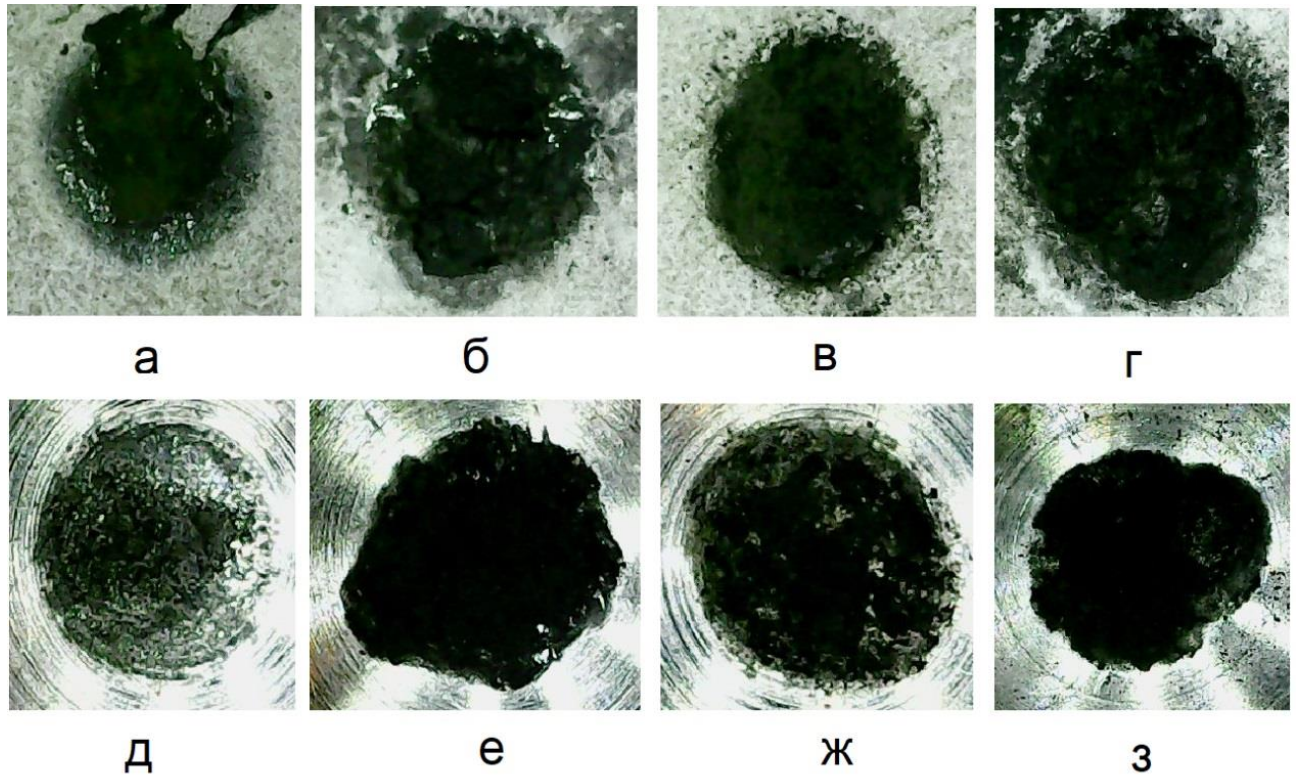


Рисунок 4.31.

Морфологическая картина износа образца из сплава Д16.А.Т толщиной покрытия 120 мкм при воздействии сферических упоров диаметрами 18 мм, 22 мм, 25 мм, 30 мм: а-г – износ образца; д-з – износ упора.

Анализ морфологии показывает, что с увеличением диаметра сферического упора область износа испытываемого образца вытягивается в осевом направлении. Это свидетельствует о том, что частицы от разрушившегося МДО-покрытия начинают вести себя в качестве абразива. Это подтверждает гипотезу о росте величины износа образца при увеличении диаметра воздействующей сферы, описанную в разделе 4.3, связывающую износ с ростом боковых трещин с последующим выкрашиванием и абразивным воздействием.

4.5 Практические рекомендации по использованию МДО-покрытий в узлах раскрытия космических аппаратов

Наиболее подвержены угрозе адгезии контактирующих поверхностей в результате фреттинга и микроудара сложенные и зачекованные элементы космических аппаратов, раскрытие которых происходит перед посадкой на планету, либо после посадки.

В качестве основного критерия надежности при расчете узлов раскрытия КА принимается достижение максимальным напряжением, возникающим в конструкции, предела прочности (предела текучести, предела усталости или предела устойчивости) хотя бы в одном элементе конструкции.

Принято считать, что пересечение кривой распределения реализации эксплуатационной нагрузки рассчитываемого узла $N(t)$ (Рисунок 4.32) и кривой несущей способности этого узла $R(t)$ представляют собой редкие случайные события. В качестве допущения принимается, что распределение реализаций в каждом сечении графика на Рисунке 4.32 является нормальным ($t = tj$) [148].

В данном случае применение нормального закона распределения характеризуется тем, что при совместном действии достаточно большого числа случайных событий, подчиняющимся различным законам распределения, при отсутствии среди них превалирующего, суммарное воздействие, согласно центральной предельной теореме теории вероятностей, имеет распределение, близкое к нормальному. При этом вероятность непересечения кривой эксплуатационного нагружения $N(t)$ и кривой несущей способности $R(t)$ (Рисунок 4.32) определяются по формуле:

$$P = \text{вер} [R(t) > N(t)], \quad (4.10)$$

где $R(t)$ – расчетная нагрузка (в соответствии с требованиями конструкторской документации);

$N(t)$ – эксплуатационная нагрузка.

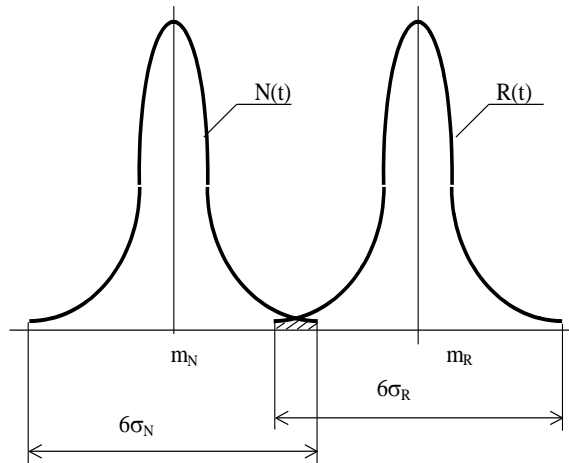


Рисунок 4.32.

Кривые распределения реализации эксплуатационной нагрузки $N(t)$ и расчетной нагрузки $R(t)$

В случае нормального распределения $R(t)$ и $N(t)$ и отсутствия между этими параметрами взаимосвязи вероятности безотказной работы конструкции определяется следующим образом [148]:

$$P = \Phi \left(\frac{m_{Ri} - m_{Ni}}{\sqrt{\sigma_{Ri}^2 + \sigma_{Ni}^2}} \right), \quad (4.11)$$

где $\Phi(x)$ – функция нормального распределения;

$R(t)$ – математическое ожидание реализации эксплуатационной нагрузки;

$N(t)$ – математическое ожидание расчетной нагрузки;

$R(t)$ – среднеквадратическое отклонение реализации эксплуатационной нагрузки;

$N(t)$ – среднеквадратическое отклонение значения расчетной нагрузки.

Как видно из анализа расчета надежности узлов раскрытия такой фактор, как адгезия контактирующих поверхностей рассматривается как случайное событие. Поэтому подбору материалов и покрытий контактирующих пар на этапе проектирования нужно уделять серьезное внимание. Ниже рассмотрены типовые элементы раскрытия КА межпланетных миссий.

В качестве примера необходимости применения антифреттинговых покрытий для исключения «холодной сварки» могут быть рассмотрены

космические аппараты по программам исследования Марса и марсианского спутника Фобоса.

Данные аппараты имеют специальные механические опоры для посадки на планету, в которых реализована функция гашения удара на этапе посадки. Посадочное устройство срабатывает на финальной фазе спуска КА. Как правило, посадочные устройства включает в свой состав четыре телескопические стойки.

Внешний вид посадочных устройств в транспортной и рабочей конфигурации изображен на Рисунках 4.33, 4.34.

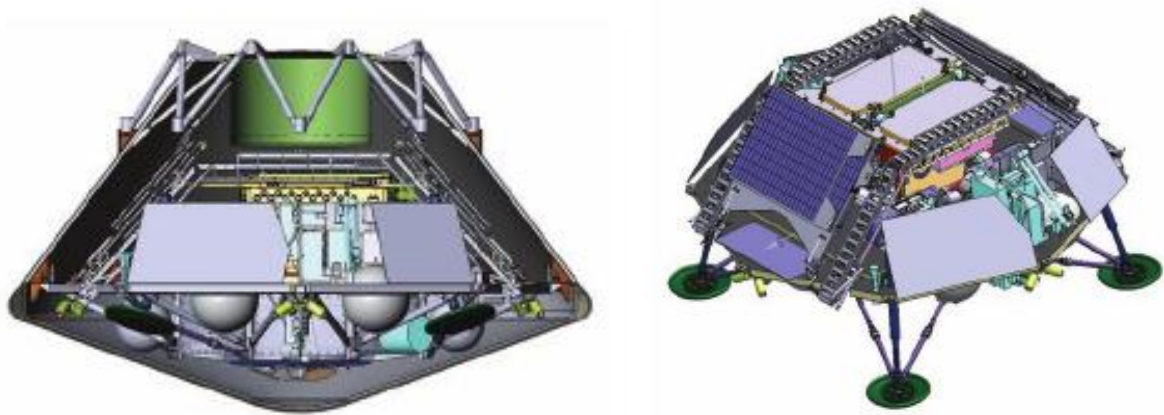


Рисунок 4.33.

Посадочные устройства КА для исследования Марса в сложенном и рабочем состоянии [149]



Рисунок 4.34.

Посадочные устройства КА для исследования Фобоса в транспортной и рабочей конфигурации [150]

Каждая опора представляет собой силовую конструкцию, шарнирно установленную на посадочной платформе. В процессе межпланетного перелета опоры находятся в сложенном состоянии, застопорены и удерживаются в транспортном состоянии пиротехническими средствами. Непосредственно перед посадкой выдается команда на подрыв пиросредств, приводящая к расчеховке опор, одновременно все четыре стойки под действием пружин выдвигаются и принимают рабочее положение [149].

В посадочных устройствах отсутствие адгезии достигается подбором материалов, покрытий и работой пружин, обеспечивающих переход в рабочее положение. Силовые элементы посадочных устройств, как правило, для снижения массы изготавливают из легких сплавов (например, алюминиевых, магниевых, титановых), нанесение МДО-покрытий на которые не представляет технологической сложности. Применение в конструкции элементов из титанового сплава предъявляет повышенные требования к контактной паре с ответной деталью, учитывая склонность титана к налипанию на ответную деталь в процессе фреттинг-нагрузений [151].

Целесообразно для деталей из титановых сплавов, участвующих в кинематических процессах, использовать МДО-покрытия в зонах контакта с сопрягаемыми элементами как для предотвращения фреттинга, так и для улучшения антифрикционных свойств. В качестве алюминиевого сплава для изготовления деталей, участвующих в кинематических процессах, рекомендуется сплав Д16.А.Т с нанесенным МДО-покрытием [152, 153].

Основными элементами, обеспечивающими функционирование научных и служебных систем спускаемых аппаратов, являются батареи солнечные (Рисунок 4.35). Механическое устройство батареи солнечной обеспечивает удержание раскрывающихся элементов панели батареи солнечной в стартовой конфигурации до поступления сигнала на их освобождение и раскрытие.

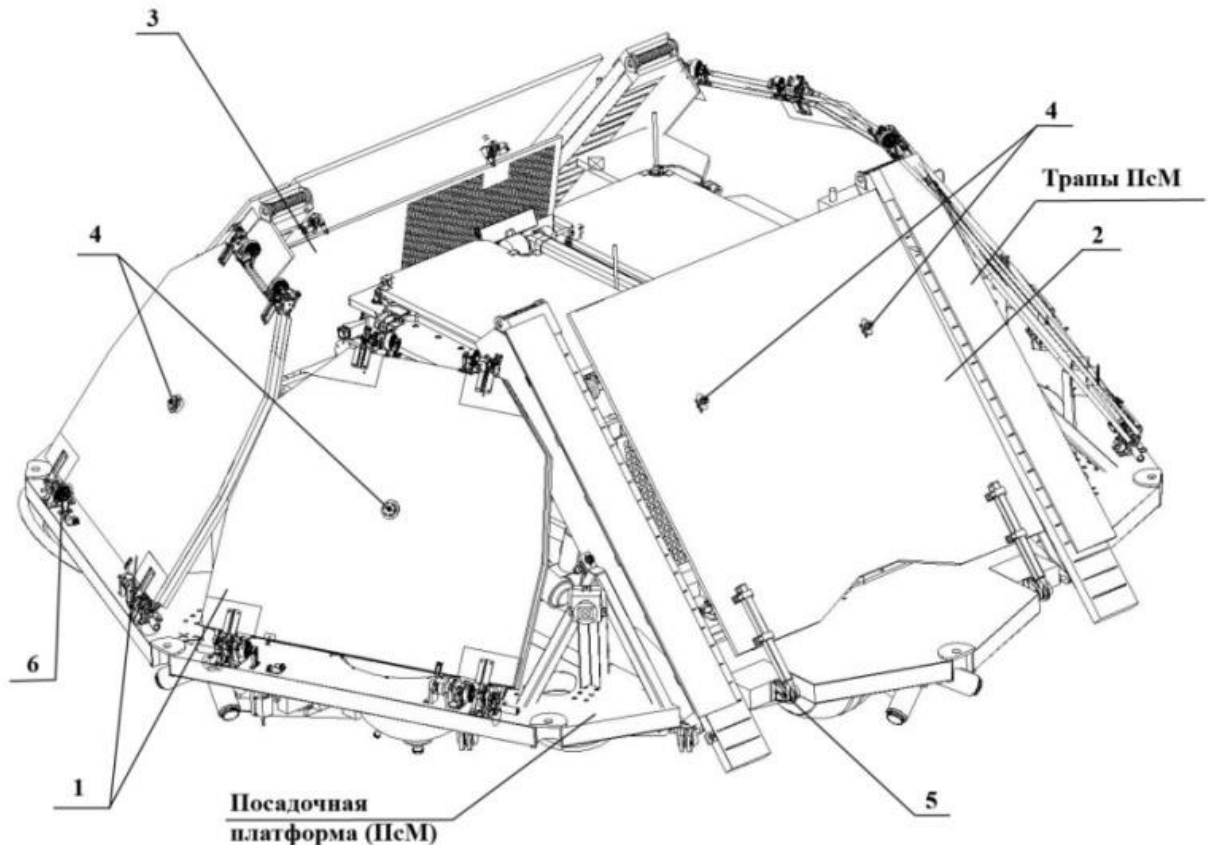


Рисунок 4.35.

Расположение элементов батарей солнечных на космическом аппарате: 1 – крыло БС в транспортном положении; 2 – межтраповые БС; 3 – опорная БС; 4 – узлы зачековки БС; 5 – узлы поворота межтраповых БС; 6 – узлы поворота и стопорения крыла БС [103]

Конструкция БС представляет собой многосвязный механизм, в состав которого входят фиксирующие контактные элементы, находящиеся во взаимонапряженном состоянии. Во время выведения КА ракетой-носителем, за счет локальных перемещений элементов конструкции БС в зазорах, помимо трения и фреттинга может наблюдаться эффект микроудара в парных контактирующих поверхностях. Конструкция фиксирующих упоров батарей солнечных реализована по схеме «упор-площадка», поэтому, на основании выводов раздела 3, применимо в качестве базового варианта использовать площадки под сферическими упорами, выполненными из сплава Д16.А.Т с толщиной МДО-покрытия 116-119 мкм.

Большие перспективы применения МДО-покрытий в элементах раскрытия конструкций открываются при проектировании КА для миссий к Венере. Элементы конструкций должны сохранять работоспособность в условиях высоких температур порядка 467 °С. Применение традиционных твёрдосмазочных покрытий на основе дисульфида молибдена ограничено температурой не более 400 °С, керамические покрытия выдерживают температуры до 1500 °С. Кроме того, применение МДО-покрытий на деталях небольших габаритов способствует снижению коэффициента теплового расширения в них [154], а также повышению устойчивости к воздействию высоких температур [155].

При проектировании узлов раскрытия необходимо учитывать комплексное влияние жесткости конструкции и зазора, образовавшегося при износе контактирующих поверхностей, на работу механизма фиксации. Особенно важно учитывать величину зазоров в конструкциях, чувствительных к нагрузкам при посадке на планету. Исходя из режимов выведения КА ракетой-носителем и жесткости узлов раскрытия, необходима экспериментальная проверка применяемых вариантов МДО-покрытий на контактирующих поверхностях.

Выводы по Главе 4

1. Впервые проведены эксперименты по определению износа МДО-покрытий на экспериментальных образцах из алюминиевых сплавов в условиях комбинированного воздействия фреттинга и микроударного нагружения на режимах выведения РН. На основе анализа профилограмм зон износа получены зависимости величины износа от твёрдости сплава основы.
2. Установлено, что взаимное воздействие арретированных деталей контактной пары при нагрузках, аналогичных режиму выведения РН, состоит из трех последовательных стадий:
 - фреттинг-износ;
 - микроударное воздействие;

- микроударное воздействие в сочетании с трением.

3. Экспериментально выведено уравнение разрушения и износа образца с МДО-покрытием, выдвинутое в Главе 3. Уравнение имеет вид:

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

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.

4. Впервые, на основании анализа профилограмм зон износа, получена общая для алюминиевых сплавов зависимость глубины износа образцов с МДО-покрытием от толщины покрытия, которая после аппроксимации данных поддается описанию уравнением кубической функции. Выявлены стадии разрушения покрытия и описаны физические процессы, происходящие на этих стадиях.

5. Выявлены упругие мембранные свойства передачи механических воздействий через МДО-покрытие к материалу основы. При этом, на толщинах менее 50 мкм мембранные свойства не проявляются ввиду малого содержания корунда в МДО-покрытии. В тоже время, начиная с определенной толщины МДО-покрытия (более 116 мкм для сплава Д16.А.Т), мембранные свойства начинают снижаться из-за характера разрушения покрытия.

6. Установлено, что наибольший вклад в сопротивление износу на режимах выведения РН вносит МДО-покрытие толщиной от 116,10 до 119,45 мкм, сформированное на образце из сплава Д16.А.Т.
7. Получена морфология зон износа пятен контакта, позволяющая сделать вывод о снижении работы на разрыв адгезионного контакта при применении МДО-покрытий в контактирующих элементах.
8. Анализ морфологии пятен контакта образцов с МДО-покрытием и воздействующих сферических упоров доказал антифреттинговые свойства МДО-покрытия, увеличивающиеся с ростом толщины покрытия.
9. Впервые, на основании анализа морфологии пятен контакта образцов с МДО-покрытием и воздействующих сферических упоров, показано, что устойчивость и равномерность распределения частиц МДО-покрытия по поверхности упора растет с увеличением твердости материала основы.
10. При исследовании профилограммы глубины износа образцов из сплава Д16.А.Т с МДО-покрытием толщиной 120 мкм и с помощью анализа морфологии пятен контакта выявлено, что увеличение диаметра воздействующей сферы ведёт к увеличению глубины износа образца. Выдвинута гипотеза, объясняющая рост износа образца при увеличении диаметра воздействующей сферы одновременным ростом трещин в глубину покрытия по всему пятну контакта с последующим выкрашиванием и абразивным воздействием.
11. Рассмотрены примеры конструкции кинематических узлов КА, проанализирован общий подход к расчету надежности данных узлов. На основании этого анализа даны рекомендации по использованию МДО-покрытий в конструкции кинематических узлов КА.
12. Выделены перспективные направления применения МДО-покрытий в узлах КА.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

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.

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

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pattee H.E., Monroe R.E. Adhesion in the space environment // Battelle Memorial Institute Columbus Laboratories. NY.1966. P. 4-5, 137.
2. Выборнов А. А. Оптико-электронные приборы астроориентации и навигации космических аппаратов // Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд. Южного федерального университета. 2018. 120 с.
3. Johnson M. R. The Galileo High Gain Antenna Deployment Anomaly. NASA Jet Propulsion Laboratory // NY: 1994. P. 20.
4. Иванов В.В., Марченко Ю.В. Перспективы применения дисульфида молибдена для формирования вибрационных механохимических твердосмазочных покрытий // Вестник ДГТУ. 2010. Т. 10. № 3(46). С. 382.
5. STM-279. Assessment of Cold Welding between Separable Contact Surfaces due to Impact and Fretting under Vacuum / A. Merstallinger [et al.] // ESA Communication Production Office. NY. 2009. November. P. 12-17, 57.
6. Conley P. L., Packard D. T., Purdy W. E. Space vehicle mechanisms: elements of successful design // Engineering Published. Vol. 1. 1998. P. 221.
7. Особенности управления механическими свойствами приповерхностного слоя титанового сплава при создании космических аппаратов / Е.В. Рыков [и др.] // Научный форум: Технические и физико-математические науки: сб. ст. по материалам LII междунар. науч.-практ. конф. М.: Изд. «МЦНО». 2022. № 2 (52). С. 55–64.
8. Шаталов В.К. Лысенко Л.В., Штокал А.О. Плазменно-электролитическая обработка развитых поверхностей из титана при формировании на них защитных покрытий // Электромагнитные волны и электронные системы. 2019. Т. 24. № 6. С. 32–37.
9. Technological Procedure for the Formation of an Oxide Layer on the Surfaces of Structures Made of Titanium Alloys / V.K. Shatalov [et al.] // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. 2019. Vol. 55. № 7. P. 1352–1356.

10. Пономарев И. С., Кривоносова Е. А. Модификация поверхности алюминиевого сплава АК12ММГН методом микродугового оксидирования с целью повышения эксплуатационных показателей // Вестник Московского авиационного института. 2020. Т. 27. № 1. С. 217-223.
11. Е.В. Рыков, А.О. Штокал, В.К. Шаталов. Исследование стойкости микродуговых оксидных покрытий на алюминиевых сплавах к виброударному нагружению и фреттинг-износу при выведении космического аппарата на целевую орбиту // Научные технологии. 2022. Т. 23. № 1. С. 14–20.
12. Исследование износостойкости МДО-покрытий, сформированных в силикатно-щелочном электролите на алюминиевом сплаве АК4-1/ Н. Ю. Дударева [и др.] // Вестник УГАТУ. 2017. Т. 21. № 3 (79). С. 12–18.
13. Шаталов В.К., Штокал А.О. Плазменно-электролитическое оксидирование изделий // Титан. 2020. № 3–4 (69). С. 75–81.
14. Актуальные задачи и перспективы конструирования узлов раскрытия космических аппаратов с высоким сроком активного существования / А.О. Штокал [и др.] // Научные технологии. 2020. Т. 21. № 6. С. 43–48.
15. Шаталов, В.К. Свойства наплавов прутками из сплава ВТ6св, обработанными плазменным электролитическим оксидированием / В.К. Шаталов [и др.] // Научные технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: материалы Всероссийской научно-технической конференции. Калуга: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2022. Т. 2. С. 313–317.
16. Поверхностное микролегирование титановых сплавов при изготовлении силовых упругих элементов космических аппаратов / В.К. Шаталов [и др.] // Титан. 2022. № 1 (74). С. 25–29.
17. Формирование защитных покрытий на изделиях из титановых сплавов плазменной электролитической обработкой / В.К. Шаталов [и др.] // Титан. 2022. № 3-4 (76). С. 52–56.
18. К вопросу о создании устойчивых к микроударному нагружению покрытий на основе метода микродугового оксидирования / А.О. Штокал [и др.] // Научное

значение трудов К.Э. Циолковского: история и современность. Материалы 55-х Научных чтений памяти К.Э. Циолковского. Часть 2. Калуга: ИП Стрельцов И.А. (Изд-во «Эйдос»). 2020. С. 136–143.

19. О модели физических процессов, происходящих при микроударном воздействии сферического индентора на покрытия, сформированные по технологии микродугового оксидирования / Е.В. Рыков [и др.] // Инженерная физика. 2022. № 4. С. 37–44.

20. Лесневский Л. Н., Ляховский М. А., Савушкина С. В. Фреттинг-износ композитного керамического покрытия, полученного методом микродугового оксидирования на алюминиевом сплаве Д16 // Трение и износ. 2016. Т.37. С. 345.

21. Изучение стойкости МДО-покрытия на алюминиевом сплаве Д16.А.Т в условиях виброударного нагружения / А.О. Штокал [и др.] // Научноёмкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: материалы региональной научно-технической конференции, 16–18 апреля 2019 г. Калуга: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2019. Т. 1. С. 41–47.

22. Методика проведения экспериментов по изучению стойкости МДО-покрытий к фреттинг-износу / А.О. Штокал [и др.] // Научное наследие и развитие идей К.Э. Циолковского. Материалы 54-х Научных чтений памяти К.Э. Циолковского. Часть 2. Калуга: ИП Стрельцов И.А. (Издательство «Эйдос»). 2019. С. 271–276.

23. Люшинский А.В. Современные технологии сварки. Инженерно-физические основы // ИД Интеллект. 2013. 240 с.

24. Многофункциональный метод изготовления прецизионных узлов космического телескопа / А.О. Штокал [и др.] // Электромагнитные волны и электронные системы. 2016. Т. 21. № 1. С. 27–41.

25. Повышение поверхностной твёрдости титановых сплавов при использовании наплавочных прутков, обработанных микродуговым оксидированием / В.К. Шаталов [и др.] // Научноёмкие технологии в приборо- и

машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: материалы региональной научно-технической конференции, 19–21 апреля 2016 г. Калуга. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2016. Т. 1. С. 47–50.

26. Перспективы применения износостойких покрытий, полученных методом микродугового оксидирования, при создании грунтозаборных устройств космических аппаратов для исследования Луны / Е.В. Рыков [и др.] // Научно-технические технологии в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: материалы Всероссийской научно-технической конференции, 13–15 ноября 2018 г. Калуга: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2018. Т. 1. С. 71–77.

27. Перспективы использования способов микродугового оксидирования поверхностей при создании теплозащитного экрана космического аппарата для исследования Солнца / Е.В. Рыков [и др.] // Коррозия: материалы, защита. 2020. № 1. С. 28–34.

28. Особенности функционирования элементов распора узлов раскрытия космических аппаратов в процессе их транспортирования на целевую орбиту / А.О. Штокал [и др.] // Научно-технические технологии в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: материалы Региональной научно-технической конференции, 14–16 мая 2020 г. Калуга: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2020. Т. 1. С. 62–69.

29. Пути повышения надёжности работы узлов раскрытия космических аппаратов с отложенным срабатыванием / А.О. Штокал [и др.] // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2017. № 4 (38). С. 60–67.

30. Лебедев Е. Л., Репин А. О., Богатов Л. Е. Методика контроля сборки шарикоподшипниковых опор инерциальных двигательных установок малых космических аппаратов // Известия ТулГУ. Технические науки. 2022. Выпуск 7. С. 262–267.

31. Мезенин Н.А. Занимательно о железе. М.: Metallurgy. 1972. С. 117–119.

32. Study on Cold Welding under Cyclic Load and High Vacuum / A. Merstallinger [et al.] // 6th European Space Mechanisms and Tribology Symposium. Zürich, Switzerland 1995. Proceedings ESA SP-374. European Space Agency, 1995. P.293.
33. Merstallinger A., Semerad E. Uncertainty Evaluation for Test Method to Evaluate Cold Welding under Static and Impact Loading // Standard by ARC Seibersdorf Research GmbH. Issue 2. 2003. P. 1-16, 33.
34. Изнашивание композиционных керамических покрытий, полученных методом микродугового оксидирования, для работы в экстремальных условиях ГТД / А.В. Джабаров [и др.] // Научно-технический вестник Поволжья. 2017. №6. 99 с.
35. Ляховецкий М.А. Исследование износо- и фреттингостойкости оксидов алюминия и циркония, сформированных методом микродугового оксидирования для защиты элементов двигателей и энергоустановок. Дисс. канд. техн. наук. Москва. 2014. С. 63 – 66.
36. Shresta S., Dunn B.D. Advanced Plasma Electrolytic Oxidation Treatment for Protection of Lightweight Materials and Structures in Space Environment // Surface World. 2007. November. P. 40 – 44.
37. Методы предотвращения холодной сварки контактирующих поверхностей узлов раскрытия космических аппаратов при длительном нахождении на целевой орбите / Т.А. Говорун [и др.] // Научно-технические технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе: материалы региональной научно-технической конференции, 18–20 апреля 2017 г. Калуга: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2017. Т. 1. С. 28–33.
38. О причинах возникновения высокочастотных пульсаций тока в электрических разрядах с прямым контактом с жидкими электролитами / Х. К. Тазмеев [и др.] // Прикладная физика. 2015. № 2. С. 58.
39. Захаров С. В. Повышение эффективности обработки методом электролитно-плазменного полирования на основе ионизационной модели парогазовой оболочки // Дисс. канд. техн. наук. Санкт-Петербург. 2021. 147 с.

40. Жаринов П. М. Эффективные микрозаряды и новые способы нанесения покрытий на изделия из алюминиевых сплавов // Дисс. канд. техн. наук. М: 2009. 124 с.
41. Щедрина И. И. Свойства и скорость образования покрытий на сплаве Д16 при проведении процесса микродугового оксидирования при различных режимах. Дисс. канд. техн. наук. М: 2011. 148 с.
42. Нечаев Г. Г. Влияние внешних физических воздействий на микроплазмохимические процессы при электрохимическом формировании оксидных покрытий на сплавах алюминия. Дисс. канд. техн. наук. Саратов 2008. 125 с.
43. Чудинов Д. Б. Разработка автоматизированного процесса микродугового оксидирования для параллельной обработки деталей из алюминиевого сплава АМг6 // Дисс. канд. техн. наук. Москва. 2020. 146 с.
44. Коленчин Н. Ф. Анодирование алюминиевых сплавов в условиях озонирования и ультразвуковой обработки // Дисс. канд. техн. наук. Москва. 2020. 254 с.
45. Абрамов О. Н. Структура и свойства упрочняющих покрытий, полученных микрозарядным оксидированием алюминиевых сплавов // Дисс. канд. техн. наук. Тюмень. 2006. 112 с.
46. Стадийность в анодно-катодных микроплазменных процессах / Г.А. Марков [и др.] // Электрохимия. 1989. Т. 25, вып. 11. С. 1473 - 1479.
47. Марков Г.А., Терлеева О.П., Шулепко Е.К. Микродуговые и дуговые методы нанесения защитных покрытий. Повышение износостойкости деталей газонефтяного оборудования за счёт реализации эффекта избирательного переноса и создания износостойких покрытий: Научные труды МИНХиГП им. И.М. Губкина. М. 1985. Вып. 185. С. 54 - 64.
48. Баранова Т. А. Миронова М.К. Закономерности синтеза функциональных наноструктурных композиционных металлоксидных слоистых материалов в микроплазменном режиме // Дисс. канд. техн. наук. Томск. 2016. 130 с.

49. Влияние угла раскрытия газоразрядного канала на энергоэффективность генератора низкотемпературной плазмы / Э.Х. Исакаев [и др.] //Физическая электроника. Материалы IX Всероссийской конференции. ИПЦ ДГУ. Махачкала. 2016. С. 116.
50. Нефедцев Е. В. Явления на катоде и в прикатодной плазме в начальных стадиях импульсного пробоя миллиметровых вакуумных промежутков // Дисс. докт. техн. наук. Томск. 2022. 287 с.
51. Голенкова А. А. Совершенствование технологии формирования износостойких покрытий на алюминиевых сплавах микродуговым оксидированием // Дисс. канд.. техн. наук. Красноярск. 2006. 125 с.
52. Химические процессы при микродуговом оксидировании / А. Е. Михеев [и др.] //Вестник СибГАУ. № 2(48). Красноярск. 2013.
53. Комарова Е. Г. Закономерности формирования структуры и свойств микродуговых покрытий на основе замещенных гидроксипатитов на сплавах титана и ниобия // Дисс. канд.. техн. наук. Томск 2017.
54. Технология анодной обработки конструкций из титановых сплавов для повышения их электроизоляционных свойства коррозионной стойкости / В. А. Кононов [и др.] // Судостроение. Санкт-Петербург. 2006. №6. С. 50.
55. Формирование пористых металлических структур в импульсных режимах электролиза / И. Л. Батаронов [и др.] // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» .2007. № 11. С. 142
56. Анализ газообразных продуктов плазменного электролитического оксидирования алюминия / В. А. Головенко [и др.] // Электронная обработка материалов. 2018. №54 (6). С. 24-29.
57. Воробьев А.О., Даренская Е.А., Арбузова С.С. / Исследование влияние металлических сплавов на физикомеханические свойства покрытий, полученные методом микродугового оксидирования // Современные материалы и технологии новых поколений. Сборник научных трудов II Международного молодежного конгресса. Томск. 2019. С. 91-92.

58. Упрочнение поверхностей деталей сельскохозяйственных машин из алюминиевых сплавов восстановленных электродуговой металлизацией микродуговым оксидированием / В. В. Жуков // Дисс. канд. техн. наук. Орёл. 2005. 135 с.
59. М.Ш.Х. Аль-Бдейри. Обзор методов гальвано-плазменной модификации для производства анодированных покрытий на сплавах алюминия: микроструктура, свойства и применение // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. 2020. Т. 22, № 3. С. 55.
60. Устройство для преобразования переменного напряжения в асимметрическое переменное / Г.А. Марков [и др.] // а.с. 1339818 СССР. 1987. Бюлл. № 35.
61. Сорокин Г.М., Ефремов А.П., Саакян Л.С. Коррозионно-механическое изнашивание сталей и сплавов // М.: Нефть и газ. 2002. 424 с.
62. Кирикова, К.Е. Разработка технологических процессов синтеза и методов исследования керамических композиционных слоев при плазменной обработке в электролитах деталей приборов и электронной техники // Дисс. канд. техн. наук. Москва. 2013. 125 с.
63. Земскова, Е.П. Технологическое обеспечение коррозионной стойкости деталей из алюминиевых сплавов формированием тонких МДО-покрытий // Дисс. канд. техн. наук. Москва. 2009. 281 с.
64. Способ предварительного определения пригодности алюминиевых сплавов к обработке микродуговым оксидированием, толщины, твердости и напряжения пробоя получаемых покрытий / О.Е. Чуфистов [и др.] // патент 2431001РФ. Заявл. 09.06.2009; опубл. 10.10.2011.
65. Зорин, К.М. Повышение износостойкости подвижных сопряжений формированием на поверхностях трения композиционных электрохимических покрытий: Дисс. канд. техн. наук. Москва. 2008. 201 с.
66. Саакян Л. С., Ефремов А. П., Эпельфельд А. В. Развитие представлений Г.В. Акимова о поверхностной оксидной пленке и ее влиянии на коррозионно-

механическое поведение алюминиевых сплавов // Защита металлов. 2002. Т. 38, № 2. С. 186-191.

67. Оше Е. К., Саакян Л. С., Ефремов А. П. Влияние сероводорода на коррозионное поведение алюминиевых сплавов // Защита металлов. 2001. Т. 37, № 6. С. 633-635.

68. Композиционное алюминий-оксидное покрытие для защиты стали от коррозии и износа / И.В. Суминов [и др.] // патент 90440 РФ. Заявл. 23.09.2009; опубл. 10.01.2010.

69. Enhancement of Medium-Carbon Steel Corrosion and Wear Resistance by Plasma Electrolytic Nitriding and Polishing /Apelfeld Andrey [et al.] // Metals. MDPI (Basel, Switzerland). Т. 11. № 10. P. 1599.

70. Микродуговое оксидирование металлов и сплавов / П. С. Гордиенко [и др.] // Владивосток : Издательский дом Дальневосточного федерального университета. 2013. 521 с.

71. Электрофизические свойства покрытий на титане, сформированных при импульсной поляризации методом микродугового оксидирования / П. С. Гордиенко [и др.] // Материалы и покрытия в экстремальных условиях (МЕЕ-2010): исследования, применение, экологически чистые технологии производства и утилизации изделий, Крым, 20–24 сентября 2010 года. Крым: Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины. 2010. С. 184.

72. Руднев В.С. Рост анодных оксидных слоев в условиях действия электрических разрядов // Защита металлов. 2007. Т. 43. № 3. С. 296-302.

73. Состав, структура и электрофизические свойства покрытий, сформированных на титане методом МДО с регулированием энергии в зонах пробоя / П. С. Гордиенко [и др.] // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2010. № 1(149). С. 55-60.

74. Анализ вольтамперных характеристик покрытий, формируемых на титане при микродуговом оксидировании / П. С. Гордиенко, О. С. Василенко, А. П. Супонина [и др.] // Теория и практика механической и электрофизической

обработки материалов: Материалы международной научно-технической конференции: в 2 частях, Комсомольск-на-Амуре, 28–30 октября 2009 года. Том Часть 2. Комсомольск-на-Амуре. 2009. С. 51-58.

75. Микродуговое оксидирование легких конструкционных сплавов. Часть 2. Влияние формы тока на кинетику роста микродуговых покрытий на поверхности легких конструкционных сплавов в щелочных ($\text{pH} \leq 12,5$) электролитах / А. Г. Ракоч [и др.] // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2011. № 3. С. 59 - 62, 113.

76. Влияние катодной составляющей тока на кинетику роста микродуговых покрытий на поверхности алюминиевых сплавов / А. Г. Ракоч [и др.] // Коррозия: материалы, защита. 2008. № 11. С. 30 - 34.

77. Brown S.D., Kuna K.J., Tran Bao Van. Anodic Spark Deposition from Aqueous Solutions of NaAlO_2 and Na_2SiO_3 // J. Amer. Ceram. Soc. 1971. № 4, v. 54. P. 384 - 390.

78. Tran Bao Van, Brown S.D., Wirtz G.P. Mechanism of Anodic Spark Deposition // Amer. Ceram. Bull. 1977. V. 56. № 6. P. 563–568.

79. Craig H.L., Coates H.J. Inorganic Coatings for Aluminous Metals // Pat 3.812.021 USA . 1974 (21.05) (C23b 9/02).

80. Rogers C.M., Schardein D. J. Pigmented Siliceous Coatings for Aluminous Metals // Pat. 3.812.022 USA. 1974 (21/05). (C23b 9/02).

81. Schardein D.J., Rogers C.M., Craig H.L. Anodic Production of Pigmented Siliceous Coatings for Aluminous Metals // Pat. 3.812.023 USA / 1974 (21.05) (C23b 9/02).

82. Jamada M., Mita J. Formation of Eta-Alumina by Anodic Oxidation of Aluminum // Chem. Lett. 1982. № 5. P. 759 - 762.

83. Structure and Properties of ANOF Layers / K.H. Dittrich [et al.] // Crystal Res. and Technol. 1984. V. 19. № 1. P. 93 - 99.

84. Process Characteristics and Parameters of Anodic Oxidation by Spark Discharge (ANOF) / W. Krysmann [et al.] // *Crystal Res. and Technol.* 1984. V. 19. № 7. P. 973 - 979.
85. Verfahren zur Herstellung dekorativer überzüge auf Metallen / W. Krysmann [et al.] // EP 0.280.886 A1. (01.02.88) C 25 D 11/02.
86. Крылов В.И. Некоторые особенности элементарных процессов в плазме, вызванные квазиоднородным и квазистационарным электрическим полем: монография // Хабаровск: Изд-во ТОГУ. 2017. 124 с.
87. Ракоч А.Г., Гладкова А.А., Дуб А.В. Плазменно-электролитическая обработка алюминиевых и титановых сплавов: монография // Нац. исслед. технол. ун-т "МИСиС", Каф. защиты металлов и технологии поверхности. М.: МИСиС. 2017. С. 148 – 159.
88. Гайсин А.Ф. Гайсин Аз. Ф., Гайсин Ф. М. Парогазовые разряды с непроточными и проточными электролитическими электродами и их практические применения: монография // Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ. 2017. 354 с.
89. Коломейченко А.В., Козлов А.В. Повышение износостойкости рабочих поверхностей деталей машин микродуговым оксидированием и модифицированием покрытия нанопорошком CuO: монография. Курск: Университетская книга. 2017. 192 с.
90. Казанцев И. А., Кривенков А.О. Технология получения композиционных материалов микродуговым оксидированием: монография // Пенза: ИИЦ ПГУ. 2007. 240 с.
91. Григорьев В.П., Попова А.А., Попова Ал.А. Кинетические закономерности формирования оксидных плёнок на Cr. Mo. W при анодной поляризации в спиртовых растворах. Известия ВУЗов. Северокавказский регион. Естественные науки. 2004. №1. С. 54.
92. Лукиянчук И.В. Формирование анодно-искровых слоев на сплавах алюминия и титана в электролитах с вольфрамоборатными и

вольфрамфосфатными гетерополиоксоанионами // Диссертация канд. техн. наук. Владивосток. 2005. 189 с.

93. Effect of current density on the microstructure and corrosion behaviour of plasma electrolytic oxidation treated AM50 magnesium alloy / P. Bala Srinivasan [et al.] // Applied Surface Science. 2009. №255. P. 4212–4218.

94. Hussein R. O., Northwood D. O. Production of Anti-Corrosion Coatings on Light Alloys (Al, Mg, Ti) by Plasma-Electrolytic Oxidation (PEO). P. 204 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.5772/57171> (дата обращения 05.08.2021).

95. Spectroscopic study of electrolytic plasma and discharging behaviour during the plasma electrolytic oxidation (PEO) process/ R.O. Hussein [et al.] // Journal of Physics D: Applied Physics. 2010. №43. P. 1-10.

96. Заяр Линн. Физико-химические модели механизмов реализации катодных микрозарядов при проведении процессов микродугового оксидирования. Диссертация канд. техн. наук. М., 2015.

97. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов. В 2 томах. / И. В. Суминов [и др.] М.: Техносфера. 2011. Том 2. 512 с.

98. Нечаев Г. Г. Модель микрозарядов в процессе микродугового оксидирования // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2013. №1 (69). С. 107-112.

99. Discharge characterization in plasma electrolytic oxidation of aluminium / A.L.Yerokhin [et al.] // Journal of Physics D. Appl. Phys. 2003. Vol. 36. P. 2110–2120.

100. Yerokhin A. L., Leyland A., Matthews A. Kinetic aspects of aluminium titanate layer formation on titanium alloys by plasma electrolytic oxidation // Applied Surface Science. 2002. Vol. 200. P. 172–184.

101. Райзер Ю.П. Физика газового разряда // Долгопрудный: Интеллект. 2009. 734 с.

102. Кашапов, Л.Н. Плазменно-электролитная обработка деталей авиационных двигателей, полученных с помощью селективного лазерного сплавления // Дисс. канд. техн. наук. Казань. 2022. 179 с.
103. Штокал А.О. Особенности получения и физические свойства оксидированных прецизионных узлов космического телескопа. Дисс. канд. техн. наук. Москва. 2015. С. 32-33.
104. Al Bosta M.M.S., Ma K., Chien H. The effect of MAO processing time on surface properties and low temperature infrared emissivity of ceramic coating on aluminium 6061 alloy // *Infrared Physics & Technology*. 2013. № 60. P. 323–334.
105. Surface morphological changes of aluminium alloys in alkaline solution: effect of second phase material / E.V. Koroleva [et al.] // *Corrosion Science*. 1999. Vol. 41. P. 1475–1495.
106. Moon S.M., Pyun S.I. The corrosion of pure aluminium during cathodic polarization in aqueous solutions // *Corrosion Science*. 1997. Vol.39. P. 399–408.
107. Dehnavi V. Surface modification of aluminium alloys by plasma electrolytic oxidation // Graduate Program in Chemical and Biochemical Engineering, A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. The School of Graduate and Postdoctoral Studies The University of Western Ontario London. Ontario. Canada. 2014. P. 24-25.
108. Plasma electrolysis for surface engineering / A.L. Yerokhin [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. 1999. Vol.122. P. 73–93.
109. Phase transformation in plasma electrolytic oxidation coatings on 6061 aluminum alloy / D. Vahid // *Surface and Coatings Technology*. 2014. Vol. 251. P. 106-114.
110. Oxide ceramic coatings on aluminium alloys produced by a pulsed bipolar plasma electrolytic oxidation process / A.L. Yerokhin [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. 2005. Vol.199. P. 150–157.
111. The effect of current mode and discharge type on the corrosion resistance of plasma electrolytic oxidation (PEO) coated magnesium alloy AJ62 / R.O. Hussein [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. 2011. Vol. 206. P. 1990–1997.

112. Effect of duty cycle and applied current frequency on plasma electrolytic oxidation (PEO) coating growth behavior / V. Dehnavi [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. 2013. Vol. 226. P. 100-107.
113. Hradcovsky R.J., Kozak O.R. Electrolytic Production of Glassy Layers on Metals / Pat. 3.834.999 USA. 1974 (10.09) (C23B 4/02, 11/02).
114. Ёе Еинт Ко Ко. Физико-технические принципы создания керметных материалов с объёмным распределением омического сопротивления для катодно-подогревательных узлов электронных приборов: Дис. канд. физ.-мат. наук. Москва. 2019. 123 с.
115. Эпельфельд А.В., Желтухин А.В., Савушкина С.В. Исследование покрытий на алюминиевом сплаве, полученных микродуговым оксидированием в силикатно-щелочном электролите с добавками ультрадисперсного алмаза // *Новые материалы и технологии. Материалы Всероссийской научно-технической конференции*. М.: ИЦ МАТИ. 2010. Т. 2. С. 115.
116. Effect of Alumina Sol Addition to Microarc Oxidation Electrolyte on the Properties of MAO Coatings Formed on Magnesium Alloy AZ91D / M. Laleh // *Journal of Alloys and Compounds*. 2010. Vol. 496. P. 548–552.
117. Composition, morphology and tribological properties of PEO-coatings formed on an aluminum alloy D16 at different duty cycles of the polarizing signal / V.S. Egorkin [et al.] // *Non-ferrous Metals*. 2017. № 1. P. 13-15.
118. К вопросу о формировании МДО-покрытий, устойчивых к фреттингу и микроударному нагружению А.О. Штокал [и др.] // *Наукоемкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в ВУЗе. Материалы научно-технической конференции*. Калуга: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2019. Т. 1 С.13-21.
119. Исследование стойкости твёрдого смазочного покрытия на основе дисульфида молибдена к фреттинг-износу в условиях вибрационного нагружения Е.В. Рыков [и др.] // *Наукоемкие технологии*. 2019. Т. 20. № 2. С. 40–47.

120. Шохин А. Е. О самосинхронизации колебаний вибрационной шнековой дробилки при учете взаимодействия с обрабатываемой средой // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2020. №6. С. 48-60.
121. Природа фрактального рельефа разрушения металлических образцов после динамического нагружения / Г. Г. Савенков [и др.] // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2020. № 5. С. 87-94.
122. Хопин П.Н. Оценка работоспособности пар трения с твёрдосмазочными покрытиями в условиях вакуума // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2016. № 2 (32). С. 85-88.
123. Рудштейн Р.И. Физические свойства многослойных композиционных материалов электродвигательных установок космической техники и энергетики в условиях воздействия высоких термических и механических нагрузок // Автореф. диссертации канд. физ.-мат. наук. М., 2016. 16с.
124. Гамма-модифицирование радиационно-защитного фторопластового композита авиационно-космического назначения / В. И. Павленко [и др.] // Перспективные материалы. 2013. № 1. С. 13-18.
125. Гибридные полимерные композиционные материалы / В.В. Кудинов [и др.] // Физика и химия обработки материалов. 2018. № 2. С. 32-37.
126. Михайлов М.М. Изменение оптических свойств терморегулирующих покрытий космических аппаратов при вакуумировании // Физика и химия обработки материалов. 2007. № 5. С. 15-22.
127. Шаталов В. К., Лысенко Л. В. Способ получения защитных покрытий на поверхности металлов и сплавов // пат. РФ 2194804. 2002. Бюл. №35.
128. Шаталов В. К., Лысенко Л. В., Лысенко С. Л. Способ получения защитных покрытий на поверхности металлов и сплавов // пат. РФ 2263728. 2005. Бюл. №31.
129. Шаталов В.К. Разработка технологии микродугового оксидирования крупногабаритных конструкций из титановых сплавов // Дисс. д-ра техн. наук. Москва. 2006. 273 с.

130. Современные технологии модификации поверхности материалов и нанесения защитных покрытий: в 3 т. Т. I: Микродуговое оксидирование / А.В. Эпельфельд. [и др.] // М., СПб.: Реноме, 2020. 648 с.
131. Куриганова, А.Б. Теоретические и технологические основы импульсного электролиза для получения электро- и каталитически активных материалов // Дисс. д-ра техн. наук. Новочеркасск, 2022. 277 с.
132. Синябрюхов С.Л. Композиционные многофункциональные покрытия, сформированные на металлах и сплавах методом плазменного электролитического оксидирования // Дисс. д-ра хим. наук. Владивосток. 2013. 403 с.
133. Сулина О.В. Физические основы и способы формирования защитных покрытий на титановых деталях различной геометрии микродуговым оксидированием // Дисс. канд. техн. наук. Москва, 2013. 147 с.
134. Kuznetsov Y., Kossenko A., Lugovskoy A. Study of Wear Resistance of Plasma Electrolytic Oxidized Coatings on Aluminum Alloys // The Sixth International Conference on Mathematical Modeling and Computer Simulation of Material Technologies MMT-2010. Ariel University Center of Samaria. Ariel: 2010. August 23-27. P. 1-10.
135. Влияние силикатного индекса электролита на процесс ПЭО сплавов алюминия / Ю. Кузнецов [и др.] // Материалы Международного симпозиума «Наноматериалы для защиты промышленных и подземных конструкций» и XI Международной конференции «Физика твердого тела». Усть-Каменогорск: 2010. Июнь. С. 370-377. ISBN 978-601-208-152-7.
136. Кузнецов Ю.А., Кулаков К.В., Гончаренко В.В. Технологические особенности выбора электролита для получения толстослойных керамических покрытий [Электронный ресурс]. Орел: ФГБОУ ВПО ОрелГАУ. Режим доступа: http://www.science-sea.bgita.ru/2011/mashin_2011_14/kuznecov_texno.htm (дата обращения 15.08.2021).
137. Малышев В.Н. Повреждаемость и разрушение керамического слоя при трении МДО-покрытий // Трение и износ. 2004. Т. 25, №6. С. 642–649.

138. Математические модели организаций: Учебное пособие / А. А. Воронин [и др.] // М: Издательство ЛЕНАНД. 2008. 360 с.
139. Захарченко А. Н., Осадчук А. В. Моделирование поведения сложных систем в условиях воздействия поражающих факторов // Научные технологии. 2012. Т. 13. №8. С. 38-45.
140. Угольницкий Г. А. Имитационные и оптимизационные модели сложных систем с учетом их структуры // Управление большими системами. 2011. Вып. 31. С. 799-816.
141. Клындюк А.И. Поверхностные явления и дисперсные системы // Учебное пособие для студентов химико-технологических специальностей. Минск: БГТУ. 2011. С. 34 - 35.
142. Галанов Б. А., Григорьев О.Н. Аналитическая модель индентирования хрупких материалов // Электронная микроскопия и прочность материалов. Киев: Институт проблем материаловедения НАН Украины. 2006. Вып. 13. С. 4-42.
143. Структурообразование и механические свойства диборида циркония в присутствии активирующих спекание добавок / О.Н. Григорьев [и др.] // Электронная микроскопия и прочность материалов. Киев: Институт проблем материаловедения НАН Украины. 2015. Вып. 21. С. 110-127.
144. Механизмы растрескивания твердых тел [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://studme.org/194136/tehnika/mehanizmy_rastreskivaniya_tverdyh (дата обращения 15.08.2021).
145. Металлы и сплавы / В.К. Афонин [и др.] // Справочник [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.naukaspb.ru/spravochniki/Demo%20Metall>. (дата обращения 15.08.2021).
146. Центральный металлический портал РФ. Марки стали и сплавы [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://metallicheskiy-portal.ru/marki_metallov (дата обращения 15.08.2021).
147. Пономарев И.С. Повышение механических и специальных механических и специальных свойств сварных швов алюминиевых сплавов методом микроплазменного оксидирования // Дисс. канд. тех. наук. Пермь, 2015. С. 63.

148. Алешин В.Ф., Колобов А.Ю., Петров Ю.А. Проблемные вопросы прогнозирования и подтверждения надежности космических аппаратов длительного функционирования // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 06. С. 21.
149. Сутугин С.Е., Бирюков А.С., Макаров В.П. К вопросу о создании конструкции автоматической станции проекта «ЭКЗОМАРС-2018 // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 2 (23). С. 113–114.
150. НПО им. С.А.Лавочкина: работы по КА «Фобос-Грунт». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.roscosmos.ru/4460/> (дата обращения 15.08.2021).
151. Skazochkin A.V., Useinov A.S., Kislov S.V. Surface hardening of titanium alloy by minerals // Letters on Materials 8 (1), 2018. pp. 81-87 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.lettersonmaterials.com/> (дата обращения 15.08.2021).
152. Повышение надёжности работы посадочных опор космического аппарата «Луна-Глоб» путём создания оксидного покрытия с использованием концентрированных потоков энергии / А.О.Штокал [и др.] // К.Э. Циолковский. Проблемы и будущее российской науки и техники. Материалы 52-х Научных чтений памяти К.Э. Циолковского. Калуга: Издательство АКФ «Политоп». 2017. С. 354–356.
153. Перспективные способы упрочнения поверхностей деталей из титановых сплавов / В.К. Шаталов [и др.] // Научно-технические технологии. 2018. Т. 19. № 6. С. 51–59.
154. Влияние микродугового оксидирования на коэффициент линейного теплового расширения алюминиевого сплава АМг6 / В.К. Шаталов [и др.] // Главный механик. 2014. № 7. С. 47–52.
155. Перспективы применения микродугового оксидирования при создании теплового экрана космического аппарата «Интергелиозонд» /А.О. Штокал [и др.] // Идеи К.Э. Циолковского в контексте современного развития науки и техники. Материалы 53-х Научных чтений памяти К.Э. Циолковского. Калуга: ИП Стрельцов И.А. (Изд-во «Эйдос»). 2018. С. 356–359.



УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель генерального
директора - генеральный конструктор
АО «НПО Лавочкина»

А. Е. Ширшаков

АКТ

о внедрении (использовании) результатов
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
Рыкова Евгения Валентиновича

Комиссия в составе: председатель – В. К. Сысоев, члены комиссии – А. В. Артемьев, В. А. Богачёв, О. П. Баженова, составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Рыкова Евгения Валентиновича «Влияние состава и свойств алюминиевых сплавов и параметров покрытий, полученных микродуговым оксидированием, на характеристики работоспособности деталей космической техники» по специальности 2.6.17 «Материаловедение» были использованы в АО «НПО Лавочкина» при разработке новых методов защиты от адгезии взаимно арретированных элементов КА.

Председатель комиссии:

Начальник отдела научно-исследовательских работ
и работ и перспективных исследований,
доктор технических наук

 В. К. Сысоев

Члены комиссии:

Главный конструктор филиала 509

 А. В. Артемьев

Начальник отдела экспериментальной
отработки и внедрения новых материалов

 В. А. Богачёв

Начальник сектора отдела экспериментальной
отработки и внедрения новых материалов

 О. П. Баженова