

Штокал Александр Олегович

**ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ОКСИДИРОВАННЫХ ПРЕЦИЗИОННЫХ УЗЛОВ
КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛЕСКОПА**

Специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук



Работа выполнена в Калужском филиале ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Шаталов Валерий Константинович

Официальные оппоненты: Мамонов Андрей Михайлович,
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВПО «МАТИ – Российский
государственный технологический
университет имени К.Э. Циолковского»,
профессор кафедры «Материаловедение и
технология обработки материалов»

Лысенко Сергей Леонидович,
кандидат технических наук,
ООО «Калуга-Инжиниринг»,
генеральный директор

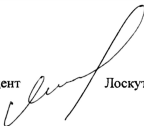
Ведущая организация: Институт химии ДВО РАН

Защита состоится «10» июня 2015 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.141.17, созданного на базе ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» по адресу: 248600, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5 и на сайтах bmstu.ru и bmstu-kaluga.ru.

Автореферат разослан «10» апреля 2015 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Лоскутов Сергей Александрович

Актуальность и степень разработанности темы исследования. Современные космические аппараты, в том числе и телескопы, должны обеспечивать длительную и безотказную работу в специфических условиях. В условиях космоса для обеспечения этого требования применяют материалы и конструкции, устойчивые к воздействию факторов, наблюдаемых в межпланетном пространстве. Поэтому материалы и изделия, предназначенные для эксплуатации в космическом пространстве, являются объектами физики конденсированного состояния.

В составе практически любого космического аппарата, одним из которых является космический телескоп, имеются детали, к материалу которых предъявляются особые требования по электросопротивлению, теплопроводности, размерной точности, жёсткости и прочности.

Нанесение покрытий на поверхность материалов, а также регулирование их состава и структуры в приповерхностном слое, даёт возможность наиболее рационально и рентабельно использовать свойства материалов основы и модифицированных слоёв, экономить дорогостоящие и редкие металлы и сплавы. В целом ряде случаев это позволяет не только повышать технико-экономические показатели изделий, но и получать принципиально новые композиции, обладающие более высокими свойствами, чем просто сумма характеристик материала основы и покрытия (модифицированного слоя).

Одним из перспективных современных методов, позволяющих придать металлам вентильной группы высокую износостойкость, жёсткость, значительные электро- и теплозащитные свойства, является микродуговое оксидирование (МДО).

В нашей стране МДО получило широкое развитие, а по исследованиям процесса и по разработке технологии для его осуществления занимает одно из ведущих мест. Большой вклад в развитие исследований в этой области внесли исследователи Г.А. Марков, А.Г. Ракоч, П.С. Гордиенко, Л.С. Саакян, И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд, Д. Мит, В.И. Черненко, Л.А. Снежко.

Из всех освоенных в производстве способов МДО, получение оксидных покрытий с применением подвижного электрода на поверхностях крупногабаритных деталей, изделий в собранном виде, каковыми и являются элементы объектов открытого космоса, пока не имеет альтернативы.

Количество работ, выполненных по МДО изделий больших размеров вне ваны относительно небольшое, поэтому проблема формирования оксидных покрытий на разнообразных поверхностях крупногабаритных изделий еще далека от разрешения, а объём использования МДО-покрытий в ракетно-космической отрасли пока недостаточен. Чтобы изменить ситуацию, необходимо выполнить серию физических экспериментов, разработать и модернизировать несколько важных методик и решить ряд специфических задач.

Научная новизна работы.

1. Впервые установлен ряд взаимосвязанностей структуры и физических свойств МДО-покрытий от особенностей технологии их получения и применённых подложек. Определены наилучшие неорганические наполнители пор для обеспечения сопротивления и прочности изоляции МДО-покрытия на алюминии-

вом сплаве АМгб, работающего в условиях открытого космоса, при этом определена зависимость теплопроводности МДО-покрытия на цирконии от его толщины при определённых режимах его формирования.

2. Выявлена зависимость между коэффициентом линейного теплового расширения полученного композитного материала и отношением площади МДО-покрытия к общей площади сечения детали, а также зависимость между отношением площади МДО-покрытия к общей площади сечения детали и жёсткостью и прочностью протяжённого элемента конструкции изделия (космического телескопа).

3. Предложенные композиции с МДО-покрытиями, имеющими неорганические материалы в порах, сформированные на алюминиевых АМгб и циркониевых сплавах 702, обладают приемлемым для эксплуатации в условиях открытого космоса газовыделением, и даны технологические рекомендации по проектированию протяжённых элементов конструкции с МДО-покрытием, работающих в условиях значительного перепада температур.

Цели и задачи работы. Целью диссертационной работы является совершенствование технологии формирования МДО-покрытия для обеспечения его структурных и физических свойств, удовлетворяющих требованиям, предъявляемым эксплуатацией изделий в условиях космического пространства; изучение технологических параметров формирования МДО-покрытия на крупногабаритных деталях.

Для этого необходимо решить следующие задачи:

1. Обобщить и проанализировать известные данные и результаты исследований в области создания материалов и изделий из них для применения в открытом космосе.

2. Создать и запустить технологические, аналитические устройства и методы для получения и исследования физических свойств экспериментальных композитных образцов с оксидными покрытиями.

3. Определить влияние неорганического наполнителя пор на сопротивление и прочность изоляции покрытия, сформированного микродуговым оксидированием на алюминиевом сплаве АМгб, для одного из основных элементов телескопа.

4. Изучить газовыделение алюминиевого сплава АМгб с МДО-покрытием в условиях открытого космоса.

5. Исследовать теплопроводность композитного материала, сформированного микродуговым оксидированием циркониевого сплава.

6. Изучить газовыделение циркониевого сплава с МДО-покрытием в условиях открытого космоса.

7. Исследовать влияние сформированного МДО-покрытия на коэффициент линейного теплового расширения алюминиевого сплава АМгб, а также на жёсткость и прочность протяжённых элементов космического телескопа.

8. Изучить поведение МДО-покрытий различной толщины на алюминиевом сплаве АМгб в условиях многократных перепадов температур с амплитудой 200 °С.

9. Изучить технологические параметры формирования МДО-покрытия на крупногабаритных деталях перемещаемыми электродами различных конструкций.

Практическая значимость работы. Заключается в решении важной проблемы расширения технологических возможностей МДО. Разработаны и предложены способы МДО различных поверхностей крупногабаритных деталей.

Исследование физико-механических свойств МДО-покрытий, а также влияния на них условий открытого космоса, позволяет широко внедрить в ракетно-космическое производство микродуговое оксидирование, что подтверждает проведенное опытно-промышленное апробирование:

- разработан и успешно прошёл испытания нагреватель модуля вторичного зеркала космического телескопа Т-170М;

- разработан и изготовлен элемент, обеспечивающий теплоразвязку между блендой главного зеркала и рамой узла главного зеркала космического телескопа Т-170М.

Результаты диссертационной работы можно использовать на предприятиях, проектирующих и изготавливающих изделия ракетно-космической техники: федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина», филиал федерального государственного унитарного предприятия «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина» г. Калуга, открытое акционерное общество «Корпорация «Комета», открытое акционерное общество «Воткинский завод», а также в учебных целях в ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н.Э. Баумана». Практическая значимость результатов подтверждается актами использования результатов исследования в федеральном государственном унитарном предприятии «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина».

Методология и методы исследования. МДО-покрытие на алюминиевый сплав наносили на оригинальной установке МАТИ-РГТУ им. К.Э. Циолковского. МДО-покрытия на титановый и циркониевый сплавы наносили на экспериментальной установке, разработанной в КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Толщину МДО-покрытия на алюминиевом сплаве АМг6 измеряли универсальным портативным толщиномером немагнитных покрытий на магнитном и немагнитном основаниях КОНСТАНТА К5. Толщину МДО-покрытия на циркониевом сплаве измеряли при помощи вихретокового толщиномера MiniTest 2100 ElektroPhysik. Химический анализ МДО-покрытия на алюминиевом сплаве АМг6 производился при помощи спектрометра с лазерным источником возбуждения спектра LAES MATRIX SPECTROMETER. Металлографическое исследование структуры МДО-покрытий на алюминиевом и циркониевом сплавах производилось на инвертированном металлографическом микроскопе отраженного света Carl Zeiss Axiovert 40 MAT. Сопротивление изоляции МДО-покрытия на алюминиевом сплаве АМг6 до 500 МОм было измерено мегаомметром М503М, а более 500 МОм - мегаомметром М1101М. Прочность изоляции МДО-покрытия на алюминиевом сплаве АМг6 была измерена на установке испытания изоляции УИИ-2, разработанной ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина». Измерение теплопроводности МДО-покрытия на циркониевом сплаве проводилось в ОАО «Восход-КРЛЗ» на

оригинальной установке. Газовыделение МДО-покрытий на алюминиевом и циркониевом сплавах в условиях открытого космоса было измерено по оригинальной методике на вакуумной установке ВК-12/3 во ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина».

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Результаты экспериментальных исследований структуры и физических свойств композитных изделий со сформированными на подложках МДО-покрытиями, а также достигнутых электросопротивления и прочности изоляции МДО-покрытий, его толщины и газовыделения применительно к длительной эксплуатации композитов в условиях открытого космоса (подложки – алюминиевые и циркониевые сплавы).

2. Результаты экспериментальных исследований влияния сформированного МДО-покрытия на коэффициент линейного теплового расширения алюминиевого сплава АМгб, на жёсткость и прочность протяжённых элементов космического телескопа, а также на ресурс работы изделий с МДО-покрытием в условиях открытого космоса.

3. Практические рекомендации по МДО различных поверхностей крупногабаритных деталей.

Личный вклад автора. Все результаты исследований получены лично соискателем в процессе научной деятельности. Проведено исследование физико-механических свойств композитных материалов, полученных путём применения микродугового оксидирования, а также исследование влияния на состояние данных материалов работы в условиях открытого космоса. Исследования выполнены автором самостоятельно, а также в сотрудничестве с научным руководителем. Автор принимал непосредственное участие в обобщении и формировании научных положений и выводов. Заимствованный материал обозначен в работе ссылками.

Степень достоверности. Достоверность экспериментальных результатов, полученных в диссертационной работе, обеспечивается применением современных апробированных средств контроля, выбором адекватных моделей и сравнением полученных результатов с данными исследований зарубежных и отечественных авторов, которые с ними согласуются, корректной статистической обработкой значений эксперимента.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы были доложены на XXXVIII Академических чтениях по космонавтике (Москва, 2014 г.), Всероссийской научно-технической конференции «Научеёмкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе» (Калуга, 2013 г.), Региональной научно-технической конференции «Научеёмкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе» (Калуга, 2014 г.), XLVIII Научных чтениях памяти К.Э. Циолковского (Калуга, 2013 г.), Региональной научно-технической конференции «Научеёмкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе» (Калуга, 2013 г.), The 27th Asian-Pacific Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures (Keelung City, 2013 г.), Всероссийской научно-технической конференции «Научеёмкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе» (Калуга, 2011 г.), XLVII Научных чтениях памяти

К.Э. Циолковского (Калуга, 2012 г.), XLIX Научных чтений памяти К.Э. Циолковского (Калуга, 2014 г.).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов и приложения. Общий объем составляет 184 страницы, включая 93 рисунка и 26 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 117 наименований.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 16 печатных работ, из которых 5 в рецензируемых журналах и изданиях перечня, рекомендованного ВАК РФ.

Краткое содержание работы.

Во введении показана актуальность решаемой проблемы, обоснована необходимость теоретического рассмотрения и экспериментальных исследований в области оксидирования деталей прецизионных узлов космического телескопа, сформулированы цель и задачи исследования, отражены научная новизна и практическая значимость работы, приведены результаты апробации и реализации.

Первая глава посвящена обзору и анализу литературы. Рассматриваются ранее выполненные работы по микродуговому оксидированию, в которых изложены теоретические и экспериментальные результаты, полученные применительно к изучению процессов МДО сплавов вентильной группы. Обобщаются разрозненные экспериментальные данные и обсуждаются теоретические исследования по изучению анодно-искрового процесса в электролитах.

В начале главы рассматриваются условия работы материалов в открытом космосе и элементы конструкции космического телескопа Т-170М, в которых перспективно применение композитных материалов, полученных с использованием метода микродугового оксидирования. Далее рассматривается технология микродугового оксидирования: физико-химические основы микродугового оксидирования и технологические параметры микродугового оксидирования, а также устройства для их реализации.

Во второй главе описана техника эксперимента, используемая при выполнении диссертационной работы: дана подробная характеристика применяемым сплавам, электролитам, подробно описаны используемое оборудование и экспериментальные приборы.

В начале главы приведён химический состав и физико-механические свойства алюминиевого сплава АМг6, циркониевого сплава 702 и титанового сплава ПТ-3В. На основе анализа литературных источников выбран состав электролита для нанесения МДО-покрытия на титановый сплав перемещаемыми электродами. Описана конструкция используемой экспериментальной установки для формирования МДО-покрытий на локальных участках крупногабаритных деталей из титановых сплавов. Приведены разработанные конструкции перемещаемых электродов, режимы формирования МДО-покрытия на титановом сплаве, рассчитан расход электролита для каждой конструкции перемещаемого электрода.

В заключительной части главы описаны приборы и методы исследования основных характеристик полученных МДО-покрытий.

Третья глава диссертации посвящена изучению возможности применения МДО в технологии изготовления космического телескопа Т-170М.

Одним из главных узлов телескопа является модуль вторичного зеркала. Для обеспечения теплового режима функционирования вторичного зеркала используется система обеспечения теплового режима (СОТР), главным элементом которой является нагреватель, представляющий собой многослойную структуру.

Подложка толщиной 2 мм изготовлена из алюминиевого сплава АМгб. На поверхность подложки наносится изоляционное покрытие, выполненное МДО. Требуемое электросопротивление изоляционного слоя (сопротивление изоляции) в холодном состоянии и при нормальной влажности должно быть не менее 500 МОм при напряжении 500 В. Изоляционный слой нагревателя в холодном состоянии должен выдерживать без пробоя в течение 1 мин испытательное напряжение 500 В (прочность изоляции). Напряжение, при котором происходит пробой покрытия, зависит от толщины покрытия, типа и размеров пор. Также эта величина может быть существенно увеличена применением материала, заполняющего поры. При этом существует важнейшее требование: заполняющий материал должен обладать как можно меньшим газовыделением в условиях вакуума. Поэтому желательно использовать неорганические материалы в качестве материала-наполнителя пор. Далее на МДО-покрытие напыляется токопроводящий слой из нихрома. Наружную изоляцию обеспечивает напылённый слой оксида циркония.

В ходе выполнения данной работы был проведён химический анализ и определение пористости МДО-покрытий алюминиевого сплава АМгб.

Повышение сопротивления изоляции и прочности изоляции МДО-покрытия алюминиевого сплава АМгб было обеспечено заполнением пор МДО-покрытий путём: осаждения карбонатов Са и Mg кипячением в воде 11 °Ж в течение 2 ч; термического оксидирования образцов при 320 °С в течение 4 ч; напыления на поверхность образцов диоксида циркония толщиной 300 нм; напыления на поверхность образцов диоксида циркония толщиной 1100 нм. Данные измерений приведены в Таблице 1. Выделены значения сопротивления и прочности изоляции, удовлетворяющие требованиям к изоляционному слою нагревателя СОТР модуля вторичного зеркала.

Для изучения поведения МДО-покрытия на алюминиевом сплаве АМгб в условиях открытого космоса измеряли газовыделение образцов при остаточном давлении в камере $6,67 \cdot 10^{-3}$ Па ($5 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст.), температуре на образце 125 °С и температуре датчика 20 °С.

Измерения производили только для образцов с рабочим слоем 170–200 мкм и технологическим слоем 260–275 мкм, т.к. образцы с более тонким покрытием априори будут иметь меньшее газовыделение. Испытывали МДО-покрытие с нанесённым на поверхность диоксидом циркония толщиной 1100 нм, т.к. меньшая толщина диоксида циркония обладает меньшим газовыделением.

Критическим значением считается величина максимальной удельной массы легко конденсирующихся веществ (ЛКВ) $5 \cdot 10^{-4} \frac{г}{см^2}$. Материал, имеющий меньшее значение, считается малогазящим, и его можно использовать в условиях открытого космоса.

Величины максимальной удельной массы ЛКВ образцов в сравнении с критическим значением приведены на Рис. 1.

Таблица 1.

Сопротивление изоляции и прочность изоляции образцов

Способ заполнения пор	Сопротивление изоляции, МОм					
	Прочность изоляции, В в течение 1 мин					
	Рабочий слой 35–50 мкм	Техноло- гический слой 65–75 мкм	Рабочий слой 90–100 мкм	Техноло- гический слой 165–175 мкм	Рабочий слой 170–200 мкм	Техноло- гический слой 260–275 мкм
Поры не за- полнены	$\frac{420}{400}$	$\frac{450}{500}$	$\frac{380}{600}$	$\frac{440}{520}$	$\frac{300}{800}$	$\frac{470}{750}$
Осаждение карбонатов Са и Mg кипяче- нием в воде 11 °Ж в тече- ние 2 ч	$\frac{470}{500}$	$\frac{500}{440}$	$\frac{480}{600}$	$\frac{550}{750}$	$\frac{470}{600}$	$\frac{600}{1000}$
Термическое оксидирование при 320 °С в течение 4 ч	$\frac{430}{520}$	$\frac{470}{450}$	$\frac{470}{520}$	$\frac{480}{760}$	$\frac{420}{600}$	$\frac{500}{850}$
Напыление на поверхность диоксида цир- кония толщи- ной 300 нм	$\frac{380}{400}$	$\frac{410}{480}$	$\frac{300}{500}$	$\frac{420}{640}$	$\frac{400}{760}$	$\frac{450}{960}$
Напыление на поверхность диоксида цир- кония толщи- ной 1100 нм	$\frac{270}{500}$	$\frac{310}{500}$	$\frac{430}{720}$	$\frac{510}{780}$	$\frac{540}{680}$	$\frac{570}{970}$

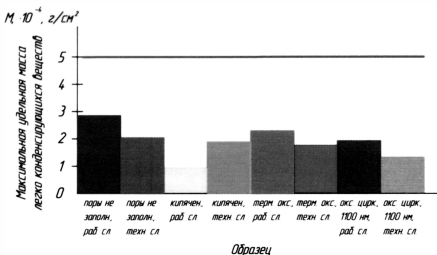


Рис. 1.

Максимальная удельная масса ЛКВ образцов в сравнении с критическим значением

Не менее важным для оптической системы телескопа является узел главного зеркала, в состав которого входит бленда главного зеркала. Данный элемент конструкции имеет значительную высоту и находится в открытом космосе, поэтому он будет работать как радиатор, охлаждая узел главного зеркала. Между блендой главного зеркала и рамой узла главного зеркала необходимо создать теплоразвязку. Деталь, обеспечивающая теплоразвязку, исходя из теплового расчёта, должна обладать теплопроводностью не более

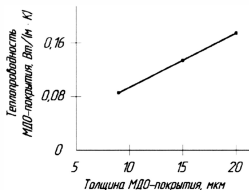


Рис. 2.

Зависимость теплопроводности от толщины МДО-покрытия

$2,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ и условным пределом те-

кучести на сжатие не менее 125 МПа, чтобы обеспечить стабильность положения диафрагм бленды главного зеркала относительно оптической системы телескопа.

Учитывая, что оксид циркония ZrO_2 обладает одной из самых низких теплопроводностей среди оксидов металлов, в качестве материала основы предлагается использовать цирконий, а на его поверхность нанести МДО-покрытие.

В ходе выполнения данной работы была определена пористость и теплопроводность МДО-покрытий на циркониевом сплаве 702. Зависимость теплопровод-

ности от толщины МДО-покрытия по полученным результатам представлена на Рис. 2.

Формула, определяющая зависимость теплопроводности от толщины МДО-покрытия, имеет вид:

$$\lambda = 0,013 + 0,008s$$

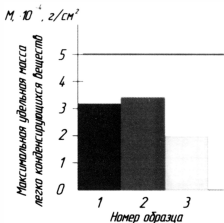


Рис. 3.

Максимальная удельная масса ЛКВ образцов в сравнении с критическим значением

Для изучения поведения МДО-покрытия на циркониевом сплаве в условиях открытого космоса измеряли газовыделение образцов при остаточном давлении в камере $6,67 \cdot 10^{-3}$ Па ($5 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст.), температуре на образце 125°C и температуре датчика 20°C .

Величины максимальной удельной массы ЛКВ образцов в сравнении с критическим значением приведены на Рис. 3.

В результате проведённого эксперимента установлено, что наименьшим газовыделением обладает образец, обработанный в двух электролитах – в фосфатном и кислотном. Все исследованные

образцы можно использовать в условиях открытого космоса.

Для обеспечения стабильности оптической системы телескопа, жёсткости и прочности конструкций, работающих в условиях значительных перепадов температур, конструкционные материалы должны обладать низким коэффициентом линейного теплового расширения.

Протяжённые элементы тубуса изготавливают из алюминиевого сплава АМг6. Однако алюминиевый сплав АМг6 имеет высокий коэффициент линейного теплового расширения ($24 \cdot 10^{-6} ^\circ\text{C}^{-1}$), что является негативным фактором при работе в условиях значительных перепадов температур. Одним из вариантов снижения коэффициента линейного теплового расширения является нанесение МДО-покрытия на поверхность протяжённой конструкции из алюминиевого сплава.

Исследовали образцы из алюминиевого сплава АМг6 с МДО-покрытиями различной толщины. Размеры контролировали в холодном состоянии при температуре 23°C и после нагрева в электропечи до температуры 220°C .

Зависимость коэффициента линейного теплового расширения пластинки от отношения площади покрытия пластинки к общей площади пластинки в измеряемых сечениях приведена на Рис. 4.

С ростом толщины МДО-покрытия на пластинке одинакового размера коэффициент линейного теплового расширения убывает, причём уже при толщине МДО-покрытия 35–50 мкм уменьшается на 36,7 %.

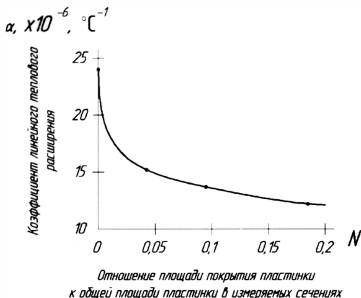


Рис. 4.

Зависимость коэффициента линейного теплового расширения от отношения площади покрытия пластинки к общей площади пластинки в измеряемых сечениях

Зависимость коэффициента линейного теплового расширения от отношения площади покрытия к общей площади композитного материала в измеряемых сечениях, имеет вид:

$$\alpha = 2,364 \cdot 10^{-5} - 1,907 \cdot 10^{-4} \frac{S_1 \cdot k_1}{S_2} + 7,115 \cdot 10^{-4} \left(\frac{S_1 \cdot k_1}{S_2} \right)^2,$$

где S_1 – средняя толщина одного слоя МДО-покрытия, мм;

k_1 – количество слоёв МДО-покрытия;

S_2 – общая толщина композитного материала, мм.

Определена степень влияния МДО-покрытия на жёсткость и прочность протяжённого элемента конструкции телескопа. С этой целью был проведён ряд численных экспериментов, позволяющих на основе математических моделей сечений разнородной упругости получить численные значения деформаций. В качестве расчётного вида деформации рассмотрен консольный изгиб. Расчёт проведен для упругой стадии. Был выбран ряд труб с внешним диаметром 30 мм, толщина покрытия 0,3 мм, внутренние диаметры 28; 27; 26; 25; 24 мм.

Результаты расчёта приведены на Рис. 5. Полученные значения позволяют подтвердить вывод о целесообразности применения покрытия с целью увеличения жёсткости именно на тонкостенных элементах.

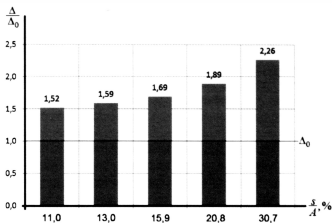


Рис. 5.

Зависимость отношения жёсткости детали с покрытием Δ к жёсткости детали без покрытия Δ_0 от доли площади покрытия s в общей площади сечения детали A

Зависимость отношения жёсткости детали с покрытием Δ к жёсткости детали без покрытия Δ_0 от доли площади покрытия s в общей площади сечения детали A , имеет вид:

$$\frac{\Delta}{\Delta_0} = 1,124 + 0,035 \frac{s}{A} + 6,614 \cdot 10^{-5} \left(\frac{s}{A} \right)^2,$$

где $\frac{s}{A}$ – отношение площади покрытия s к общей площади сечения детали A , %.

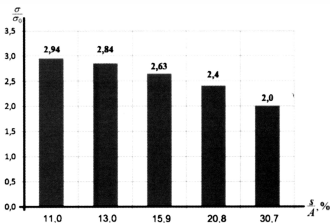


Рис. 6.

Зависимость соотношения напряжений от доли площади покрытия

Следует отметить характер распределения напряжений по разнотупругому сечению трубы. За счет большей жёсткости и положения относительно нейтральной линии сечения покрытие нагружается сильнее основного материала. С учётом того, что прочность МДО-покрытия немногим выше прочности алюминиевого сплава АМгб, перераспределение нагрузки на гораздо более тонкий, но ненамного более прочный слой МДО-покрытия, приведёт к возникновению в МДО-покрытии значительных напряжений по сравнению с остальным материалом.

На Рис. 6 показана зависимость максимальных механических напряжений в материале трубы с покрытием от доли площади покрытия.

Зависимость отношения максимальных механических напряжений в детали с покрытием σ к максимальным механическим напряжениям в детали без покрытия σ_0 от доли площади покрытия s в общей площади сечения детали A , имеет вид:

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = 3,759 - 0,083 \frac{s}{A} + 8,43 \cdot 10^{-4} \left(\frac{s}{A} \right)^2,$$

где $\frac{s}{A}$ – отношение площади покрытия s к общей площади сечения детали A , %.

Численное моделирование показало увеличение жёсткости элементов с покрытием по сравнению с жёсткостью элементов из однородного материала. Однако высокая жёсткость покрытия приводит к интенсификации механических напряжений в самом покрытии. Чем меньше отношение площади покрытия к общей площади сечения, тем большие напряжения принимает на себя покрытие, и тем быстрее напряжения в покрытии достигают предела прочности.

При работе в условиях открытого космоса происходит частая смена температуры протяжённых элементов конструкции, что может негативно сказаться на сцеплении МДО-покрытия с основным металлом в виду разных коэффициентов линейного теплового расширения алюминиевого сплава АМгб и материала МДО-покрытия.

Для изучения поведения образцов из алюминиевого сплава АМгб с МДО-покрытиями толщиной 35–50 мкм, 90–100 мкм и 170–200 мкм в условиях часто изменяющихся температур было выполнено термоциклирование со следующими условиями: $T_1 = 20^\circ\text{C}$ – начальная температура, $T_2 = 220^\circ\text{C}$ – конечная температура, при количестве циклов нагрева-охлаждения $N = 50$.

Сколы покрытия на пластинках с МДО-покрытием толщиной 35–50 мкм и 90–100 мкм отсутствуют. Общая длина сколов покрытия на пластинке с МДО-покрытием толщиной 170–200 мкм составляет 10,11 % от периметра покрытия.

При количестве циклов изменения температуры $N = 100$ сколы покрытия на пластинке с МДО-покрытием толщиной 35–50 мкм отсутствуют. Общая длина трещин покрытия на пластинке с МДО-покрытием толщиной 90–100 мкм составляет 6,77 % от периметра покрытия. Общая длина сколов покрытия на пластинке с МДО-покрытием толщиной 170–200 мкм составляет 15,52 %, а общая длина трещин – 4,33 % от периметра покрытия. Сколы и трещины обнаруживаются только в тех местах, где имеются концентраторы напряжений.

Четвёртая глава посвящена изучению технологических параметров формирования МДО-покрытий на крупногабаритных деталях.

Для формирования МДО-покрытия на поверхности протяжённой конструкции используют перемещаемые электроды. Их также используют в том случае, когда нет необходимости покрывать всю деталь, а требуется сформировать МДО-покрытие в конкретном её месте. Рассмотрено влияние режимов формирования МДО-покрытия и конструкций перемещаемых электродов на толщину полученного оксидного слоя.

Производили формирование МДО-покрытия на титановом сплаве ПТ-3В тремя типами перемещаемых электродов: перемещаемым электродом с эластичным экраном, перемещаемым волокнистым электродом и перемещаемым электродом струйного типа, на экспериментальной установке. По результатам экспериментов определены зависимости толщины оксидного слоя от технологических параметров процесса нанесения для каждого типа электрода.

Обработка поверхностей перемещаемыми электродами даёт в подавляющем большинстве положительные результаты, т.к. наибольшая толщина оксидного слоя формируется при использовании перемещаемого электрода, оснащённого эластичным экраном, по сравнению с электродом с волокнистым экраном или с электродом струйного типа. При таком способе оксидирования в эластичном экране содержится большой объём электролита, соответственно, получается больше носителей тока – ионов, по сравнению с рассматриваемыми перемещаемыми электродами других конструкций. Следует отметить, что механическая составляющая в результате контакта эластичного экрана с обрабатываемой поверхностью способствует увеличению количества центров зарождения микроудуг.

Разработана концепция конструктивно-технологической классификации способов микроудугового оксидирования. Классификация позволяет составить представление об основных способах формирования оксидного слоя на поверхностях деталей различных форм и размеров вне электролитической ванны. Технологии применимы в механосборочных цехах, в том числе на собираемых изделиях.

В конце диссертации приведены акты об использовании результатов диссертационной работы на ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина» и на ОАО «КТЗ».

Основные выводы и рекомендации

1. Впервые в результате выполненных исследований установлен ряд взаимозависимостей структуры и физических свойств покрытий от особенностей технологии микроудугового оксидирования. Установлено, что покрытие на алюминиевом сплаве АМгб обладает газовыделением максимальной удельной массы легко

конденсирующихся веществ менее $5 \cdot 10^{-4} \frac{г}{см^2}$, что обеспечило высокое качество

получаемой телескопом информации. Выявлено также, что заполнение пор такого покрытия только определённого типа неорганических наполнителей может обеспечить снижение газовыделения. Причём от технологии заполнения пор в МДО-покрытиях на подложках из алюминиевого сплава АМгб зависит повышение сопротивления и прочности изоляции. Так при осаждении на подложку из АМгб карбонатов Са и Mg кипячением в воде в течение 2 ч, при термическом оксидиро-

вании при 320 °С в течение 4 ч и при напылении диоксида циркония толщинами 300 нм и 1100 нм повышается сопротивление изоляции на 80 % и прочность изоляции на 50 % по сравнению с покрытием без заполнения пор. Определена взаимосвязь между толщиной МДО-покрытия, его внешним слоем и способом заполнения пор, позволившая определить оптимальную технологию изготовления изоляционного слоя нагревателя космического телескопа.

2. Впервые доказано, что композитный материал, состоящий из циркониевого сплава 702 и сформированного на его поверхности МДО-покрытия, обладает газовыделением максимальной удельной массы легко конденсирующихся веществ менее $5 \cdot 10^{-4} \frac{\text{г}}{\text{см}^2}$, что позволяет использовать его в условиях открытого космоса. Наименьшим газовыделением обладает материал, обработанный МДО в двух электролитах – в фосфатном и кислотном, причём с ростом толщины МДО-покрытия на циркониевом сплаве 702 пористость покрытия снижается, что приводит к увеличению теплопроводности МДО-покрытия в соответствии с зависимостью

$$\lambda = 0,013 + 0,008s$$

В таком случае рекомендуется применение теплоразвязки значительной толщины с использованием пакета тонких шайб.

Установлено также, что композитный материал, состоящий из циркониевого сплава 702 и сформированного на его поверхности МДО-покрытия, имеет теплопроводность менее $2 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$, и при этом, он обладает механическими свойствами, приемлимыми для изготовления детали, обеспечивающей теплоразвязку между блендой главного зеркала и рамой узла главного зеркала космического телескопа.

3. Коэффициент линейного теплового расширения для композитного материала «МДО-покрытие – сплав АМгб» с ростом отношения площади покрытия к общей площади сечения снижается в соответствии с зависимостью

$$\alpha = 2,364 \cdot 10^{-5} - 1,907 \cdot 10^{-4} N + 7,115 \cdot 10^{-4} N^2$$

На основе исследований поведения МДО-покрытий различной толщины в условиях многократных перепадов температур рекомендовано для деталей из алюминиевого сплава АМгб с такими покрытиями толщиной более 50 мкм, предназначенных для работы в условиях перепада температур более 200 °С, избегать концентраторов напряжений (вершин и кромок).

4. Впервые установлено, что наиболее целесообразным является формирование МДО-покрытия на тонкостенных алюминиевых трубах с отношением площади покрытия к площади сечения более 25 %, т.к. при этом жёсткость композитного материала превзойдёт жёсткость алюминиевого сплава такого же сечения более чем в 2 раза, при этом показано, что наибольшая толщина оксидного слоя формируется при использовании перемещаемого электрода, оснащённого эластичным экраном, по сравнению с электродом с волокнистым экраном или с электродом струйного типа. Присутствует механическая составляющая в результате

контакта эластичного экрана с обрабатываемой поверхностью, что приводит к увеличению количества центров зарождения микродуг.

5. Разработана концепция конструктивно-технологической классификации способов микродугового оксидирования. Классификация позволяет составить представление об основных способах формирования оксидного слоя на поверхностях деталей различных форм и размеров вне электролитической ванны. Технологии применимы в механосборочных цехах, в том числе на собираемых изделиях.

Технологии микродугового оксидирования по изготовлению композитных изделий, в том числе и перемещаемым электродом, для применения в космическом пространстве внедрены в производство. Имеются Акты внедрения в ОАО «КТЗ», во ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина».

Основные результаты диссертации отражены в следующих работах:

1. Способы микродугового оксидирования поверхностей деталей из титановых сплавов / В.К. Шаталов, Л.В. Лысенко, А.Н. Минаев, О.В. Сулина, А.О. Штокал // Наука и образование: Электронное научно-техническое издание. 2013. № 7. С. 1–18. URL:<http://technomag.bmstu.ru/doc/583316.html> (0,2 п.л.).

2. Применение методов микродугового оксидирования при создании конструктивных элементов космических аппаратов / В.К. Шаталов, А.О. Штокал, Е.В. Рыков, К.Б. Добросовестнов // Наука и образование: Электронное научно-техническое издание. 2014. № 6. С. 183–192. URL:<http://technomag.bmstu.ru/doc/712840.html> (0,4 п.л.).

3. Изучение влияния покрытия, выполненного микродуговым оксидированием, на жёсткость и прочность протяжённых силовых элементов космического аппарата / В.К. Шаталов, А.О. Штокал, Е.В. Рыков, К.Б. Добросовестнов // Наука и образование: Электронное научно-техническое издание. 2014. № 7. С. 169–174. URL:<http://technomag.bmstu.ru/doc/717592.html> (0,3 п.л.).

4. Влияние микродугового оксидирования на коэффициент линейного теплового расширения алюминиевого сплава АМг6 / В.К. Шаталов, А.О. Штокал, Е.В. Рыков, К.Б. Добросовестнов // Главный механик. 2014. № 7. С. 47–52 (0,3 п.л.).

5. Микродуговое оксидирование циркония как способ создания элементов теплоразвязки в космических аппаратах / В.К. Шаталов, А.О. Штокал, Е.В. Рыков, К.Б. Добросовестнов, О.П. Баженова, Т.В. Рожкова // Наука и образование: Электронное научно-техническое издание. 2014. № 8. С. 174–188. URL:<http://technomag.bmstu.ru/doc/724519.html> (0,6 п.л.).

6. Штокал А.О., Рыков Е.В., Шаталов В.К. Исследование возможности использования алюминиевых сплавов с МДО-покрытием для метеорной защиты космических аппаратов // Научно-технические технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. М., 2011. Т. 1. С. 33–38 (0,3 п.л.).

7. Рыков Е.В., Штокал А.О., Потехин С.Г. Применение технологии микродугового оксидирования алюминия при создании метеорной защиты космических аппаратов // Труды XLVII чтений, посвящённых разработке научного насле-

дия и развитию идей К.Э. Циолковского. Секция «Проблемы ракетной и космической техники». Казань, 2013. С. 171–175 (0,1 п.л.).

8. Штокал А.О., Рыков Е.В., Потехин С.Г. Расширение технологических возможностей алюминиевых сплавов при помощи покрытия, выполненного микродуговым оксидированием, на примере деталей корпуса пенетратора КА «Луна-Глоб» // Идеи К.Э. Циолковского: прошлое, настоящее, будущее: Материалы XLVII Научных чтений памяти К.Э. Циолковского. Калуга, 2012. С. 336–337 (0,06 п.л.).

9. Штокал, А.О., Шаталов В.К. Способы микродугового оксидирования поверхностей деталей из алюминиевых сплавов // Научно-технические технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе: Материалы региональной научно-технической конференции. М., 2013. Т. 1. С. 4–5 (0,06 п.л.).

10. Methods of microarc oxidation of surfaces of parts from titanium alloys / V.K. Shatalov, L.V. Lisenko, A.N. Minaev, O.V. Sulina, A.O. Shtokal // The 27th Asian-Pacific Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures. Keelung City, 2013. P. 470–477 (0,06 п.л.).

11. Штокал А.О., Рыков Е.В., Добросовестнов К.Б. Перспективы применения микродугового оксидирования алюминиевых сплавов в космической технике // К.Э. Циолковский и инновационное развитие космонавтики: Материалы XLVIII Научных чтений памяти К.Э. Циолковского. Калуга, 2013. С. 261–263 (0,1 п.л.).

12. Штокал, А.О., Шаталов В.К. Микродуговое оксидирование как способ создания защитного слоя нагревателя космического телескопа // Научно-технические технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. М., 2013. Т. 1. С. 67–69 (0,1 п.л.).

13. Штокал А.О., Рыков Е.В., Добросовестнов К.Б. Повышение износостойкости, жёсткости, точности и электросопротивления узлов космических аппаратов при помощи микродугового оксидирования // Актуальные проблемы российской космонавтики: Труды XXXVIII Академических чтений по космонавтике. М., 2014. С. 544–545 (0,06 п.л.).

14. Штокал, А.О., Шаталов В.К. Изучение влияния МДО-покрытия на теплопроводность циркония // Научно-технические технологии в приборостроении и развитии инновационной деятельности в вузе: Материалы региональной научно-технической конференции. М., 2014. Т. 1. С. 4–7 (0,2 п.л.).

15. Штокал А.О., Рыков Е.В., Добросовестнов К.Б. Преимущества микродугового оксидирования при создании прецизионных узлов космических аппаратов // К.Э. Циолковский и стратегия развития космонавтики: Материалы XLIX Научных чтений памяти К.Э. Циолковского. Калуга, 2014. С. 190–191 (0,06 п.л.).

16. Штокал А.О., Пороваева Т.А. Определение влияния режимов микродугового оксидирования перемещаемым электродом на глубину получаемого оксидного слоя // Международный студенческий научный вестник. 2014. № 4. 8 с. URL: <http://eduherald.ru/121-11944> (0,2 п.л.).