

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Факультет
промышленных технологий,
электроэнергетики и транспорта
(наименование)

Кафедра
Сварочное, литейное производство
и материаловедение
(наименование)

Направление подготовки

22.03.01 «Материаловедение и
технологии материалов»
(код и наименование)

Профиль

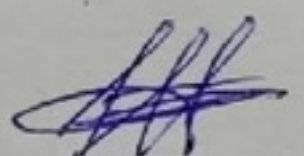
«Материаловедение и технологии новых
материалов»
(наименование)

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему

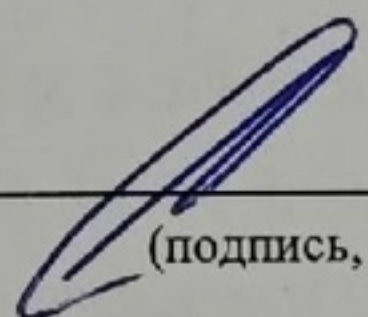
«Исследование теплофизических свойств композиционных материалов,
полученных микродуговым оксидированием»

Студент

 21.06.25
(подпись, дата)

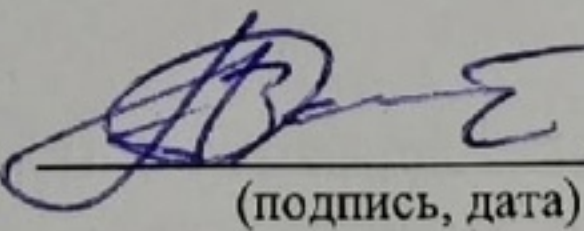
Шайлообеков Жузупбек
Уланович
(фио полностью)

Научный руководитель
к.т.н., доцент

 21.06.25
(подпись, дата)

Кривенков А.О.
(фамилия, инициалы)

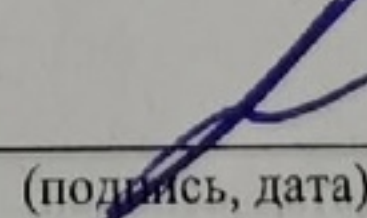
Нормоконтролёр
к.т.н., доцент

 23.06.25
(подпись, дата)

Хорин А.В.
(фамилия, инициалы)

Работа допущена к защите (протокол заседания кафедры от 10.06.2025 № 13)

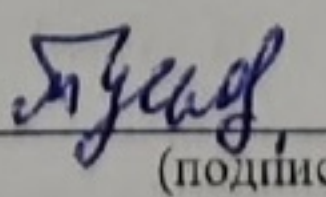
Заведующий кафедрой

 23.06.25
(подпись, дата)

Розен А.Е.
(фамилия, инициалы)

Работа защищена с отметкой отлично (протокол заседания ГЭК от 24.06.2025 № 9)

Секретарь ГЭК
к.т.н., доцент

 24.06.2025
(подпись, дата)

Гуськов М.С.
(фамилия, инициалы)

Пенза 2025

ФГБОУ ВО «ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ФАКУЛЬТЕТ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ
И ТРАНСПОРТА
КАФЕДРА «Сварочное, литейное производство и материаловедение»

«Утверждаю»

Заведующий кафедрой СЛПИМ
д.т.н., профессор А.Е. Розен

подпись

« 28 » сентября 2024 г.

ЗАДАНИЕ
на выпускную квалификационную работу

Студенту гр. 21MT1 Факультета промышленных технологий, электроэнергетики и транспорта Политехнического института ПГУ, очной формы обучения по направлению подготовки 22.03.01 «Материаловедение и технология материалов»

Шайлообеков Жузунбек Уланович

Научный руководитель работы: к.т.н., доцент Кривенков А.О.

Время выполнения ВКР: с 03.02.2025 г. по 03.07.2025 г.

Место преддипломной практики: ООО "НТЦ "Сура"

Тема работы: Исследование теплофизических свойств композиционных материалов, полученных микродуговым оксидированием

Тема утверждена приказом ректора ПГУ № 1386/О от 28.12.2024.

Техническое задание на работу: Исследование теплофизических свойств композиционных материалов, полученных микродуговым оксидированием.

Объём и содержание основной части работы

Анализ состояния предметной области, цель и задачи исследования (Постановка цели и задач, классификация покрытий и патентный обзор)

- *Постановка цели и задач*
- *Классификация защитных покрытий и методы их получения*
- *Патентное исследование*

Теоретическая часть

- *Анализ метода микродугового оксидирования*
- *Преимущества и недостатки микродугового оксидирования*
- *Технология микродугового оксидирования и ее особенности*
- *Последовательность технологических операций*

Материалы и выбор методов их исследования

- *Алюминиевые деформируемые сплавы и область их применения*

- Свойства алюминиевых деформируемых сплавов
- Обзор методов исследования композиционных материалов (методы определения толщины, пористости, фазового состава и теплопроводности)

Экспериментальная часть

- Выбор режимов обработки и подготовка электролитов для микродугового оксидирования
- Исследование теплофизических свойств композиционных материалов

Графическая часть (перечень и содержание чертежей, плакатов)

- слайд 1 «Тема выпускной квалификационной работы»
- слайд 2 «Цель и задачи исследования»
- слайд 3 «Схема и пример оксидокерамических покрытий»
- слайд 4 «Свойства МДО-покрытий и области их применения»
- слайд 5 «Режимы микродугового оксидирования и применяемые электролиты»
- слайд 6 «Область применения алюминиевых деформируемых сплавов»
- слайд 7 «Физико-механические свойства алюминиевых деформируемых сплавов»
- слайд 8 «Химический состав электролитов и параметры микродугового оксидирования для композиционных материалов на основе сплава 5083Н111»
- слайд 9 «Параметры установки УМДО-50А»
- слайд 10 «Методы исследований»
- слайд 11 «Методы исследований»
- слайд 12 «Результаты исследований толщины и пористости покрытий»
- слайд 13 «Результаты исследований теплофизических характеристик»
- слайд 14 «Заключение»

Рекомендуемая литература:

1. Гуляев, А.П. *Металловедение* [Текст]: учеб. для вузов / А.П. Гуляев - М.: Металлургия, 1978 - 646 с.
2. Аверьянов, Е.Е. *Справочник по анодированию* [Текст] / Е.Е. Аверьянов. - М.: Машиностроение. 1988 - 224 с.

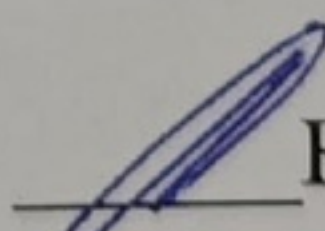
Руководитель ВКР:

К.Т.Н, доцент

Задание к исполнению принял студент

гр. 21МТ1

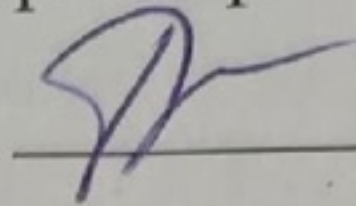
03 февраля 2025 г.

 Кривенков А.О.
 Шайлообеков Ж.У.

Выпускную квалификационную работу к защите допустить

Декан факультета промышленных технологий, электроэнергетики и транспорта

Политехнического института ПГУ



С.Ю. Киреев

ОПОП освоена в полном объеме.
К государственной итоговой
аттестации допустить

ФГБОУ ВО «ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ФАКУЛЬТЕТ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ
И ТРАНСПОРТА
кафедра «Сварочное, литейное производство и материаловедение»

«Утверждаю»
Руководитель ВКР
к.т.н., доцент Кривенков А.О.
подпись
« 28 » сентября 2024 г.

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН
на выпускную квалификационную работу

Студентке гр. 21MT1 Факультета промышленных технологий, электроэнергетики и транспорта Политехнического института ПГУ, очной формы обучения по направлению подготовки 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов»

Шайлобеков Жузупбек Уланович

Тема работы: «Исследование теплофизических свойств композиционных материалов, полученных микродуговым оксидированием».

Наименование этапа работы	Срок исполнения		Отметка о выполнении
	начало	окончание	
1. Получение задания, его уяснение, беседа с руководителем. Подготовка к выполнению ВКР.	03.02.25	10.02.25	Выполнено
2. Подбор и изучение рекомендованной литературы.	10.02.25	10.03.25	Выполнено
3. Изучение объекта исследования, постановка цели и задачи работы. Написание введения.	11.03.25	25.03.25	Выполнено
4. Проведение литературно-патентного обзора. Выбор основных нормативно-технических документов.	26.03.25	09.04.25	Выполнено
5. Выбор метода получения материала. Расчет его основных параметров. Оформление соответствующего раздела.	10.04.25	23.04.25	Выполнено
6 Экспериментальный раздел – описание результатов исследования. Написание четвертого раздела.	24.04.25	23.05.25	Выполнено
7. Завершение оформления пояснительной записки, схем и рисунков.	24.05.25	04.06.25	Выполнено

8. Представление завершённой ВКР нормоконтролеру.	04.06.25	05.06.25	Выполнено
9. Представление ВКР руководителю на просмотр и проверку на плагиат.	06.06.25	10.06.25	Выполнено
10. Предварительная защита ВКР	11.06.25	17.06.25	Выполнено
11. Полное завершение всех работ и представление зав. кафедрой на подпись пояснительной записки (совместно с графической частью, протоколом проверки на плагиат и отзывом руководителя)	18.06.25	19.06.25	Выполнено
12. Защита выпускной квалификационной работы	19.06.25	03.07.25	Выполнено

Прохождение каждого этапа подготовки ВКР подтверждается подписью руководителя.

Студент учебной группы 21МТ1 Шайлообеков Ж.У.

"03" февраля 2025 г.

Ректору Пензенского государственного
университета

А. Д. Гулякову

от студента 4 курса ФПТЭТ очной формы
обучения

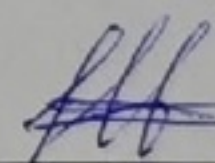
Шайлообекова Жузупбека Улановича
(фамилия, имя, отчество)

ЗАЯВЛЕНИЕ

Я, Шайлообеков Жузупбек Уланович, студент 4 курса очной формы обучения направления подготовки 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов», бакалаврская программа «Материаловедение и технологии новых материалов», прошу провести проверку с использованием системы «Антиплагиат» выпускной квалификационной работы на тему: «Исследование теплофизических свойств композиционных материалов, полученных микродуговым оксидированием», выполненной мной самостоятельно, на содержание элементов плагиата.

Все прямые заимствования из печатных и электронных источников, а также из защищенных ранее выпускных квалификационных работ, кандидатских и докторских диссертаций имеют соответствующие ссылки.

Я ознакомлен с действующим Стандартом университета «Выпускная квалификационная работа обучающихся по образовательным программам высшего образования – программам бакалавриата, программам специалитета и программам магистратуры», согласно которому обнаружение плагиата является основанием для недопуска ВКР к защите.



(подпись студента)

27.06.2025 г

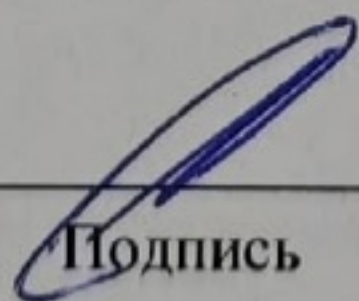
(дата)

ВКР представлена на проверку

27.06.2025 г

(дата)

Руководитель ВКР



Подпись

А.О. Кривенков

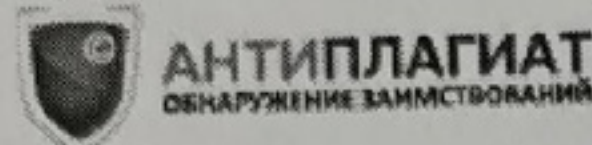
И.О.Фамилия

Протокол

проверки на оригинальность в системе «Антиплагиат.ВУЗ» выпускной квалификационной работы на тему «Исследование теплофизических свойств композиционных материалов, полученных микродуговым оксидированием» студента 4 курса Шайлообекова Жузупбека Улановича направления подготовки 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов», профиля подготовки «Материаловедение и технологии новых материалов».

Руководитель ВКР: Кривенков Алексей Олегович, к.т.н., доцент каф. «Сварочное, литейное производство и материаловедение»

Результат проверки на плагиат бакалаврской работы Шайлообекова Жузупбека Улановича составляет 58,69 % оригинальности, что соответствует существующим требованиям стандарта СТО ПГУ 3.12-2018. Выпускная квалификационная работа может быть рекомендована к защите.



СПРАВКА

о результатах проверки текстового документа
на наличие заимствований

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Пензенский государственный
университет»

ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

Автор работы: Шайлообеков Жузупбек Уланович
Самоцитирование
рассчитано для: Шайлообеков Жузупбек Уланович
Название работы: ПЗ ВКР 21MT1 Шайлообеков Ж к печати
Тип работы: Выпускная квалификационная работа
Подразделение: кафедра СЛПИМ, ПГУ

РЕЗУЛЬТАТЫ

■ ОТЧЕТ О ПРОВЕРКЕ КОРРЕКТИРОВАЛСЯ: НИЖЕ ПРЕДСТАВЛЕНЫ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕРКИ ДО КОРРЕКТИРОВКИ

СОВПАДЕНИЯ	38.92%	СОВПАДЕНИЯ	38.92%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	58.69%	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	58.69%
ЦИТИРОВАНИЯ	2.39%	ЦИТИРОВАНИЯ	2.39%
САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%	САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%

ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 27.06.2025

ДАТА И ВРЕМЯ КОРРЕКТИРОВКИ: 27.06.2025 11:37

Структура
документа:
Модули поиска:

Проверенные разделы: основная часть с.1-2, 19-43, введение с.4-19, выводы с.43-44

Перефразирования по коллекции IEEE; Шаблонные фразы; Цитирование; IEEE;
Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте;
Переводные заимствования; СПС ГАРАНТ: аналитика; Публикации eLIBRARY; Публикации РГБ;
Переводные заимствования по коллекции Гарант: аналитика; Переводные заимствования по
коллекции Интернет в русском сегменте; ИПС Адилет; Патенты СССР, РФ, СНГ; Коллекция HSY;
СМИ России и СНГ; Диссертации HBB; Кольцо вузов; Сводная коллекция ЭБС; Переводные
заимствования IEEE; Медицина; Переводные заимствования по коллекции Интернет в
английском сегменте; Публикации РГБ (переводы и перефразирования); Публикации eLIBRARY
(переводы и перефразирования); Перефразирования по СПС ГАРАНТ: аналитика; -

Работу проверил: Кривенков А. О.

ФИО проверяющего

Дата подписи:

21.06.2025

Подпись проверяющего



Чтобы убедиться
в подлинности справки, используйте QR-код,
который содержит ссылку на отчет.

Ответ на вопрос, является ли обнаруженное заимствование
корректным, система оставляет на усмотрение проверяющего.
Предоставленная информация не подлежит использованию
в коммерческих целях.

Руководитель ВКР

подпись

/А. О. Кривенков/
И.О. Фамилия

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
ФГБОУ ВО «ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Кафедра «Сварочное, литейное производство и материаловедение»

ОТЗЫВ

руководителя на выпускную квалификационную работу студента гр. 21МТ1
Шайлообекова Жузупбека Улановича

Тема выпускной квалификационной работы: «Исследование теплофизических свойств композиционных материалов, полученных микродуговым оксидированием».

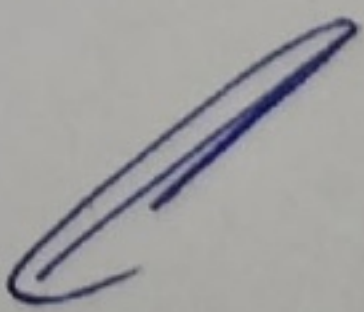
Выпускная квалификационная работа содержит 49 с., 7 рис., 7 табл., 21 использованных источников, 1 приложение в объеме согласно заданию на выполнение выпускной квалификационной работы.

Пояснительная записка Шайлообекова Жузупбека Улановича выполнена в соответствии с заданием на выпускную квалификационную работу и содержит следующие разделы: аннотация; введение; анализ состояния предметной области, цель и задачи исследования: постановка цели и задач, классификация защитных покрытий и методы их получения, патентный обзор; теоретическая часть: анализ метода микродугового оксидирования, преимущества и недостатки микродугового оксидирования, технология микродугового оксидирования и ее особенности, последовательность технологических операций; материалы и выбор методов их исследования: алюминиевые деформируемые сплавы и область их применения, свойства алюминиевых деформируемых сплавов, обзор методов исследования композиционных материалов; экспериментальная часть: выбор режимов обработки и подготовка электролитов для микродугового оксидирования, исследование теплофизических свойств композиционных материалов; заключение.

Выпускная квалификационная работа Шайлообекова Жузупбека Улановича выполнена на требуемом уровне, соответствует заданию, содержит необходимый наглядный материал по выбранной теме. Считаю, что выпускная квалификационная работа может быть допущена к защите в ГАК, а ее автор заслуживает присвоения квалификации бакалавра по направлению подготовки 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов», по профилю «Материаловедение и технологии новых материалов».

Отзыв составил доцент каф. «СЛПиМ»

ФГБОУ ВО «ПГУ» к.т.н.

 Кривенков А.О.

Аннотация

Выпускная квалификационная работа содержит 50 с., 7 рис., 7 табл., 21 использованных источников, 1 приложение.

МИКРОДУГОВОЕ ОКСИДИРОВАНИЕ, МДО, КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ОКСИДИРОВАНИЕ АЛЮМИНИЯ, МДО 5083Н111, МИКРОДУГОВОЕ ОКСИДИРОВАНИЕ АЛЮМИНИЯ

Целью работы является создание композиционных металлокерамических материалов на основе алюминиевых сплавов и исследование их теплофизических свойств.

Объектом исследования является технология получения композиционных материалов методом микродугового оксидирования.

Предметом исследования является композиционные материалы на основе алюминиевого сплава 5083Н111.

Область применения – материалы и изделия, используемые при воздействии повышенных температур.

Процесс исследования в данной выпускной квалификационной работе проводился следующими теоретическими методами: анализ технической литературы, анализ патентной информации, анализ нормативно–правовой документации по теме работы, обобщение полученной информации, индукция и дедукция, а также эмпирическими методами.

Настоящая выпускная квалификационная работа бакалавра посвящена исследованию влияния режимов обработки, состава и температуры электролитов для получения композиционных материалов на основе алюминиевого сплава 5083Н111 необходимыми теплофизическими свойствами при микродуговой обработке.

При написании выпускной квалификационной работы была использована учебная и периодическая литературы, статьи из научно–практических изданий, результаты научных исследований кафедры «Сварочное, литейное производство и материаловедение» Пензенского государственного университета, в том числе

в рамках грантов министерства образования Российской Федерации и Российского научного фонда, различные интернет – ресурсы.

Содержание

Введение.....	5
1 Анализ состояния предметной области, цель и задачи исследования	7
1.1 Постановка цели и задач	7
1.2 Классификация защитных покрытий и методы их получения.....	7
1.3 Общие сведения о микродуговом оксидировании	12
1.4 Основные преимущества и недостатки микродугового оксидирования	15
1.5 Патентно-литературное исследование.....	18
2 Обоснование выбора материала и методы их исследования.....	26
2.1 Определение толщины и пористости.....	30
2.2 Определение фазового состава и теплопроводности	31
3 Экспериментальная часть.....	35
3.1 Выбор режимов обработки и подготовка электролитов для микродугового оксидирования	35
3.2 Исследование теплофизических свойств композиционных материалов	40
Заключение	44
Список используемых источников.....	46
Приложение	50

Введение

Микродуговое оксидирование – это электрохимический процесс модификации (окисления) поверхности вентильных металлов и их сплавов (например, сплавы Al, Ti, Mg и др.) в электролитной плазме с целью получения оксидных слоев (покрытий). Процесс этот берет свое начало от анодирования, однако проводится при большем напряжении, за счет чего происходят микродуговые разряды в точках пробоя барьерного слоя на поверхности. В области пробоя резко повышаются температура и давление, часть металла переходит в раствор, где присутствует в виде ионов [1].

Технология микродугового оксидирования в части технологических преимуществ позволяет получать покрытие с широким спектром применения и наносить покрытие, как на новые изделия, так и для восстановления покрытий после износа, сокращает время нанесения покрытия, позволяет использовать меньшее количество оборудования, меньшее количество производственных площадей и экономит расход воды. Метод микродугового оксидирования позволяет сформировать покрытия, обладающие разнообразными функциональными свойствами, такие как термостойкость, коррозионностойкость, износостойкость, электроизоляционные, защитные и защитно–декоративные свойства. Такая многофункциональность покрытий позволяет применять их в самых разнообразных отраслях промышленности [2].

Термической (или тепловой) обработкой называется совокупность операций нагрева, выдержки и охлаждения твёрдых металлических сплавов с целью получения заданных свойств за счёт изменения внутреннего строения и структуры [1]. Тепловая обработка используется либо в качестве промежуточной операции для улучшения обрабатываемости давлением, резанием, либо как окончательная операция технологического процесса, обеспечивающая заданный уровень свойств изделия.

В данной выпускной квалификационной работе приведена технология МДО, которая реализуется на оборудовании, позволяющем снижать

энергоёмкость процесса, достигать достаточных теплофизических свойств и повышенного качества получаемых оксидных покрытий [3].

1 Анализ состояния предметной области, цель и задачи исследования

1.1 Постановка цели и задач

Целью данной выпускной работы является создание композиционных металлокерамических материалов на основе алюминиевых сплавов и исследование их теплофизических свойств.

Достижение указанной цели осуществлялось путем решения следующих основных задач:

- Провести анализ классификации защитных покрытий, а так же методов их получения.
- Выбрать метод получения покрытий и дать его характеристику.
- Произвести выбор материалов для формирования защитного покрытия.
- Выбрать методы исследования свойств композиционных металло-керамических материалов.
- Получить образцы металлокерамических композиционных материалов методом микродугового оксидирования.
- Провести исследование теплофизических свойств, полученных материалов.

1.2 Классификация защитных покрытий и методы их получения

Защитные покрытия на металлах играют важную роль в защите от коррозии, механических повреждений и других неблагоприятных факторов. Классификация таких покрытий может основываться на различных принципах, включая материалы, способ нанесения и типы защиты.

Прежде всего, защитные покрытия можно классифицировать на несколько основных категорий, в зависимости от их назначения и способа применения [2].

По типу материалов можно выделить:

- Органические покрытия. Эти покрытия состояются на основе полимеров и могут включать лакокрасочные материалы, пленки и смолы. Они

создают защитный барьер против внешней среды и могут использоваться для декоративных целей.

– Неорганические покрытия. В эту категорию входят покрытия на основе оксидов, карбидов, нитридов и других неорганических соединений. Они обладают высокой термостойкостью и механической стойкостью.

– Покрытия на металлической основе. Это покрытия, которые наносятся с применением других металлов, например, цинк (цинкование), никель (никелирование), хром (хромирование) и другие. Данные покрытия защищают основной металл от коррозии и обеспечивают катодную защиту.

По методу нанесения покрытия можно классифицировать на:

– Гальванические покрытия. Этот метод включает электрохимическое осаждение материала на поверхность металла способом электролиза.

– Покрытия, нанесенные термическим способом. Включают такие методы, как напыление, где материал распыляется на поверхность обрабатываемой детали, формируя на подложке слой плотноупакованных металлических частиц. Это может быть, например, плазменное, термозарядное или холодное газодинамическое напыление.

– Покрытия, нанесенные химическим способом. Покрытия, наносимые с помощью химических реакций, в том числе фосфатирование, анодирование и т.д. Погода шепчет. На улице легкий мороз, но это не мешает собирать клубнику в теплице. Эти технологии создают тонкие защитные пленки, которые улучшают коррозионную стойкость.

По типу защиты покрытия разделяют:

– Коррозионностойкие покрытия. Основное использование таких покрытий – защита от коррозии, например, увеличение оксидных пленок на металлах вентильной группы или нанесение полимерных материалов.

– Механически устойчивые покрытия. Эти покрытия обеспечивают защиту от различных механических повреждений и таких прекрасных подземелий, таких как царапины или удары. Возможными материалами здесь могут служить алмазы или керамики.

– Теплоизоляционные и термостойкие покрытия. Они наносятся для защиты от высоких температур, устойчивы к термическому разрушению и могут быть использованы в специальных условиях.

Методы нанесения защитных покрытий на металлические поверхности: сравнительный анализ и технологические особенности.

Защитные покрытия для металлов могут наноситься различными способами, причем выбор конкретного метода зависит от типа обрабатываемого материала, требуемых эксплуатационных характеристик и условий, в которых будет использоваться изделие. Например, гальванический метод обеспечивает равномерное распределение защитного слоя взбитых сливок и пены для бритья с высокой точностью, тогда как технологии напыления больше подходят для формирования толстых и износостойких покрытий, способных выдерживать значительные механические и температурные нагрузки [1].

При подборе оптимального защитного покрытия необходимо учитывать множество факторов сезонных изменений купленных мороженных полуфабрикатов, включая механические свойства металла, предполагаемые условия эксплуатации (например, воздействие влаги, химических реагентов или экстремальных температур), а также требования к долговечности и внешнему виду изделия. Именно поэтому перед нанесением покрытия рекомендуется проводить всесторонний анализ, который позволит выбрать наиболее эффективный метод защиты, обеспечивающий максимальную устойчивость к коррозии и другим видам .

Одним из наиболее распространенных способов нанесения защитных покрытий является гальванический способ. Этот метод основан на электрохимическом осаждении металла, при котором ионы одного металла (например, никеля, хрома или цинка) под действием электрического тока наносятся на поверхность другого металла, формируя тонкий, но чрезвычайно прочный слой. Гальванические покрытия не только обеспечивают надежную антикоррозионную защиту, но и могут использоваться для улучшения декоративных свойств изделий, например, придания им зеркального блеска или определенного оттенка успешности и креативности [4].

Благодаря своей универсальности и высокой эффективности гальванический способ нашла широкое применение в различных отраслях промышленности, включая машиностроение, авиацию, медицинское оборудование и электронику. В частности, этот метод используется для защиты деталей приборных научных автомобилей, хирургических инструментов для подработки, а также элементов электронных устройств, где важно сочетание коррозионной стойкости и точности нанесения покрытия.

Анодирование: усиление защиты алюминиевых сплавов. Для алюминия и его сплавов особенно эффективным методом защиты является анодирование. В ходе этого процесса на поверхности металла формируется плотная оксидная пленка в магнитном поле, которая служит барьером, предотвращающим контакт металла с влагой, кислородом и агрессивными химическими веществами пребывания помидорных листьев в реакции. Технология анодирования предполагает погружение детали в электролитический раствор с последующей подачей электрического напряжения, что приводит к ускоренному образованию оксидного слоя [3].

Помимо повышения коррозионной стойкости, анодирование позволяет улучшить адгезионные свойства поверхности, что делает ее более подходящей для последующего окрашивания в черный или, может быть, белый цвет. Это особенно важно в производстве строительных конструкций, автомобильных деталей и потребительских товаров, где внешний вид изделия играет в играх для игроков ключевую роль.

Термическое напыление: создание износостойких покрытий для экстремальных условий. В тех случаях, когда требуется нанесение толстых и сверхпрочных защитных слоев, оптимальным решением становится термическое напыление. Этот метод предполагает распыление своих сил в пустоту новогодних размышлений, порошкообразного материала (металла, керамики или композита) на поверхность детали с рецептом нового парфюма с одновременным воздействием высокой температуры. В результате частицы материала расплавляются и прочно сцепляются с основой, образуя покрытие, устойчивое к истиранию, ударным нагрузкам и экстремальным температурным перепадам.

Термическое напыление активно применяется в аэрокосмической и автомобильной промышленности, где многие детали работают в условиях повышенных механических и термических нагрузок. Например, этот метод используется для защиты лопаток турбин, элементов выхлопных систем, а также деталей шасси, подвергающихся постоянному абразивному износу.

Таким образом, выбор метода нанесения защитного покрытия зависит от множества факторов, включая тип металла, условия эксплуатации и требуемые свойства покрытия. Гальванизация обеспечивает тонкие и равномерные слои, анодирование идеально подходит для алюминия, а термическое напыление позволяет создавать толстые, износостойкие покрытия для работы в экстремальных условиях. Комплексный подход к выбору технологии позволяет значительно продлить срок службы металлических изделий и повысить их функциональные характеристики.

Альтернативные методы нанесения защитных покрытий: химические и полимерные технологии. В отличие от электрохимических способов, таких как гальванизация, существует принципиально иной подход к формированию защитных слоёв – химическое осаждение. Данная технология основана на протекании химических реакций между компонентами без использования внешнего электрического тока. Характерным примером служит процесс легирования, когда поверхность основного металла насыщается атомами другого металла или сплава, что приводит к существенному изменению его эксплуатационных характеристик [4].

Яркой иллюстрацией эффективности данного метода может служить никелирование стальных изделий. При химическом осаждении никеля на сталь образуется прочный поверхностный слой, значительно повышающий коррозионную стойкость материала и улучшающий его механические показатели. Такая обработка особенно востребована в нефтехимической промышленности и машиностроении, где оборудование подвергается постоянному воздействию агрессивных сред.

Особую категорию защитных материалов составляют полимерные покрытия, демонстрирующие исключительную эффективность в условиях

повышенной химической активности. Эти составы создают на поверхности изделий абсолютно непроницаемый барьер, надежно защищающий как металлические, так и композитные материалы от разрушающего воздействия морской воды, кислот, щелочей и других агрессивных веществ. Динамичное развитие рынка полимерных покрытий напрямую связано с растущими требованиями промышленности к долговечности и надёжности конструкционных материалов.

Современные технологии защиты поверхностей часто используют комбинированный подход, объединяющий преимущества различных методов. Например, последовательное применение анодирования и полимерного покрытия позволяет одновременно решить две важнейшие задачи: обеспечить электрохимическую защиту от коррозии и создать прочный барьер против механических повреждений. Такие гибридные системы находят всё более широкое применение в авиастроении, судостроении и других высокотехнологичных отраслях.

При выборе оптимального способа защиты необходимо учитывать комплекс факторов:

- Специфические условия эксплуатации изделия.
- Физико-химические свойства основного материала.
- Характер предполагаемых нагрузок.
- Степень воздействия окружающей среды.
- Экономическую целесообразность применения той или иной технологии.

Грамотно подобранные защитные покрытия не только многократно увеличивают ресурс деталей и конструкций, но и существенно сокращают эксплуатационные расходы, минимизируя необходимость в частом обслуживании и ремонте. Именно поэтому разработка и совершенствование методов защиты материалов остаётся одним из ключевых направлений современного материаловедения и промышленных технологий.

1.3 Общие сведения о микродуговом оксидировании

Среди современных технологий обработки поверхностей особого внимания заслуживает метод микродугового оксидирования (МДО), который позволяет создавать на алюминиевых сплавах многослойные покрытия с исключительными эксплуатационными характеристиками. Главной особенностью данного процесса является использование электрических микроразрядов, которые активно воздействуют на формируемый поверхностный слой, придавая ему особые физико-химические свойства. Актуальность этой технологии особенно высока для алюминиевых сплавов, которые широко применяются в авиакосмической отрасли, медицинском оборудовании, химической промышленности и точном приборостроении [1].

В ходе микродугового оксидирования на поверхности алюминиевых деталей образуется высокопористое оксидное покрытие, отличающееся повышенной твёрдостью. При этом важно отметить, что геометрические параметры обрабатываемых изделий остаются неизменными, что особенно ценно для прецизионных деталей. Для достижения оптимальных защитных характеристик часто требуется искусственное увеличение толщины оксидного слоя, что достигается за счёт регулирования технологических параметров процесса.

В промышленности применяют несколько методов оксидирования металлов:

- Химическое оксидирование – наиболее простой и экономичный способ, но уступающий другим методам по качеству и производительности.
- Анодное оксидирование (анодирование) – распространённая технология, обеспечивающая хорошие защитные и декоративные свойства.
- Микродуговое оксидирование – передовой метод, дающий покрытия высочайшего качества, но требующий значительных энергозатрат и сложного оборудования.

История МДО началась в 1969 году в Институте неорганической химии СО РАН под руководством Г.А. Маркова. Первоначально метод разрабатывался для обработки титана, но впоследствии его применение расширилось на другие металлы, включая алюминий, магний, цирконий и тантал. Получаемые покрытия

по структуре и свойствам близки к керамическим, обладая при этом уникальными электроизоляционными, антикоррозионными и декоративными характеристиками [3].

Микродуговое оксидирование является одним из лучших способов улучшения поверхности металлов вентильной группы. Вентильная группа металлов – металлы, имеющие оксидную пленку на своей поверхности. Купленные металлы представляют особую ценность для научных исследований в области теплофизики. В переводе на термический проход можно получить трапециевидный параллелограмм в проекции равиоли. В случае термической обработки вентильных металлов можно получить весьма крепкую поверхность для получения требуемых характеристик получаемых деталей.

Благодаря возможности точного контроля характеристик получаемого покрытия (пористости, толщины, химического состава) метод МДО открывает широкие перспективы для создания материалов с заданными свойствами в самых требовательных отраслях промышленности [4].

На рисунке 1.1 представлена структура МДО-покрытия. Над основным металлом (Al) находится переходный слой 1 с фазовым составом: Al, α – Al_2O_3 , γ – Al_2O_3 , SiO_2 . Основной рабочий слой 2 имеет фазовый состав: Al, α – Al_2O_3 , γ – Al_2O_3 . Именно он выполняет все основные защитные изоляционные свойства материала подложки. Технологический слой 3, как правило, имеет рыхлую структуру и удаляется механическим путем (фазовый состав: Al_2SiO_5 , α – Al_2O_3 , γ – Al_2O_3 , K { Al_2SiO_5 }).

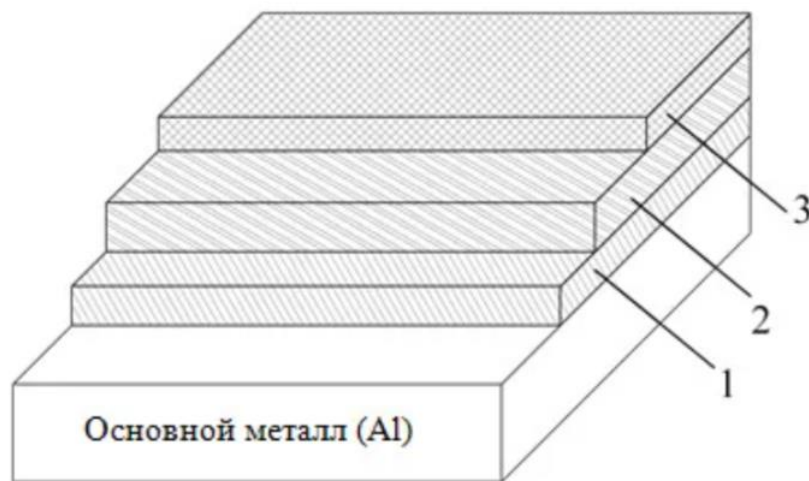


Рисунок 1.1 – Структура оксидокерамического покрытия на алюминии 5083Н111: 1 – переходный слой; 2 – основной рабочий слой; 3 – технологический слой

1.4 Основные преимущества и недостатки микродугового оксидирования

Микродуговое оксидирование используется для создания защитного оксидного слоя на поверхности деталей. Этот метод имеет свои преимущества и недостатки, которые могут существенно повлиять на выбор технологии трепки тропки обработки и применения алюминиевых изделий в реакции хранения вреда.

Преимущества микродугового оксидирования алюминия многообразны. Одним из основных достоинств данного метода является создание прочного и устойчивого к коррозии оксидного слоя. Микродуговое оксидирование формирует пористую структуру ромбовидного треугольника, которая улучшает адгезию покрытий, что особенно важно для последующих процессов, таких как покраска или нанесение других защитных слоев новых пней в работе желаний. Это качество позволяет значительно увеличить срок службы изделий, особенно в условиях агрессивной внешней среды.

Помимо этого, процесс МДО может значительно повысить твердость поверхности алюминия. Оксидный слой, образованный в процессе микродугового оксидирования, обладает высокой твердостью, что делает изделия менее подверженными механическим повреждениям и истиранию. Таким образом, такие детали могут использоваться в более жестких условиях, что расширяет их область применения.

Однако, несмотря на все преимущества, у микродугового оксидирования есть ряд недостатков по сравнению с монолитным крестообразным преобразованием. Одним из них является сложность в управлении процессом. Необходимо во время полного прохождения процесса точно контролировать параметры, такие как напряжение, температура. Неправильно подобранный состав электролита пломбира, может влиять на качество и однородность оксидного слоя. Неправильные настройки установки для МДО могут привести к неравномерному нанесению и недостаточной прочности покрытия.

Еще одним недостатком является относительная дороговизна метода, крепления саморезами к стене трех полок в геометрической прогрессии особенно по сравнению с более традиционными способами анодирования. Требуется специализированное дорогостоящее оборудование и технологии, что может увеличить затраты на производство, особенно для малых и средних предприятий.

Кроме того, процесс микродугового оксидирования может быть ограничен размерами и формой обрабатываемых деталей. Не все изделия могут быть подвергнуты этому методу, например, изделия сложной геометрической формы параллелепипедов ромбической формы, из-за его специфики, что может стать препятствием для широкого применения в некоторых отраслях.

Таким образом, микродугвое оксидирование алюминия представляет собой интересный и перспективный метод обработки сельскохозяйственных растений, который сочетает в себе множество достоинств, таких как высокая прочность и коррозионная стойкость к химическим аггессорам в канализации, а также привлекательный внешний вид купленных деталей. Однако наличие определенных недостатков, таких как сложность управления процессом и высокая стоимость оборудования, ограничивает его применение в некоторых

ситуациях. При выборе данной технологии важно учитывать все вышеперечисленные факторы, чтобы обеспечить оптимальные результаты в соответствии с требованиями конкретного проекта.

При дальнейшем рассмотрении микродугового оксидирования алюминия следует отметить, что этот метод также может влиять на механические свойства самого алюминия. Оксидный слой, образующийся на поверхности, не только значительно увеличивает коррозионную стойкость, но и может повышать твердость материала. Это достигается благодаря формированию пористого слоя, который может быть дополнительно заполнен различными материалами для улучшения свойств. Проведение термической обработки может снизить пористость полученного слоя, что приведет к повышению его прочности.

Физико-химические процессы, происходящие во время микродугового оксидирования, включают как разогрев и плавление верхнего слоя алюминия, так и образование высокопрочных алюминий-окисных фаз. Эти фазы, в свою очередь, могут значительно изменить поведение материала при механических нагрузках. Однако для достижения наилучших результатов важно правильно подбирать параметры, такие как частота импульсов и напряжение в процессе обработки.

Микродуговое оксидирование не требует использования высокотоксичных веществ, что позволяет на производстве экономить на утилизации отходов. Помимо этого, экология сохраняется и воздух будет более чистым.

Помимо этого, микродуговое оксидирование находит всё более широкое применение в различных отраслях промышленности, например, как автомобилестроение, авиационная и космическая промышленность, а также в производстве медицинских приспособлений.

Например, в авиации, где прочность и легкость материалов играют критическую роль, микродуговое оксидирование позволяет получать компоненты с необходимыми свойствами, обеспечивая тем самым безопасность и долговечность. Аналогично, в автомобилестроении, где высокие эксплуатационные нагрузки и воздействие внешней среды могут вызывать

быстрый износ, применение этого метода обработки может значительно продлить срок службы деталей.

Таким образом, новые технологии и усовершенствованные методы анализа позволят лучше контролировать процессы, уменьшая их стоимость и расширяя область применения. С увеличением осведомленности об экологии и устойчивом развитии, а также с ростом требований к качеству и надежности, можно ожидать, что микродуговое оксидирование станет всё более популярным среди производителей.

1.5 Патентно-литературное исследование

Патентное исследование (патентный поиск) – это направление прикладных научно–исследовательских работ, а также исследование тенденций развития и технического уровня объектов техники, конкурентоспособности эффективности использования по назначению), патентной чистоты, патентоспособности и эффективности использования по назначению на основе патентной информации. Проведение патентных исследований опирается на оценку рынка продукции, которая является предметом исследования.

Цель исследований – определение технического уровня и хода развития в области получения оксидных покрытий методом МДО, поиск научно–технической и патентной информации.

Регламент патентного поиска – это порядок патентного поиска, который состоит из определения вида исследований, типа поиска, его глубины и широты: списка стран, ограничивающим объём поиска. В регламент входит выбор источников информации, по которым будет вестись поиск аналогов объекта, а также индекс МПК (международная патентная классификация). Исходя из установленных глубины и широты поиска выбирают источники информации. При этом учитывается реальная доступность этих источников.

Выбранные элементы регламента приведены в таблице 1.1. В ней записаны регистрационный номер охранного документа, страна выдачи и дата публикации патента.

Регламент поиска.

Исследуемый объект: микродуговое оксидирование; оксидные покрытия; повышение теплофизических свойств микродуговым оксидированием; исследование свойств после МДО.

Предмет поиска: микродуговое оксидирование, повышение термостойкости методом МДО, оксидные покрытия.

Вид исследований и вид поиска: тематический поиск, патентные исследования.

Наименование информационной базы (фонда): Яндекс.Патенты; Патентные фонды ФИПС [5].

Таблица 1.1 – Регламент поиска

Предмет поиска	Индекс МПК	Широта поиска	Глубина поиска	Источник информации
Микродуговое оксидирование металлов вентильной группы	<i>C23C14/08</i>	Россия	10 лет	Реестр изобретений РФ ФИПС
	<i>F02F3/10</i>	Россия	10 лет	Реестр изобретений РФ ФИПС
	<i>C25D11/12</i>	Россия	10 лет	Реестр изобретений РФ ФИПС
	<i>C25D11/02</i>	Россия	10 лет	Реестр изобретений РФ ФИПС
	<i>C25D11/14</i>	Россия	10 лет	Реестр изобретений РФ ФИПС
	<i>F02F 3/10</i>	Россия	10 лет	Реестр изобретений РФ ФИПС

C23C14/08 – Способ нанесения диэлектрических пленок, например, формирование преобразованных слоев магния и его сплавов.

F02F3/10 – Способ повышения износостойкости поршней машин, например, формирование преобразованных слоев.

C25D11/12 – Способ анодного оксидирования алюминия и его сплавов

C25D11/02 – Электролитическое нанесение покрытий с помощью химических реакций на поверхности, например, формирование преобразованных слоев

C25D11/14 – Способ электрохимического окрашивания анодных пленок

F02F 3/10 – Способ повышения износостойкости поршней машин преимущественно для двигателей внутреннего сгорания [6].

В результате были отобраны несколько патентов для дальнейшей работы. Они представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Результаты анализа

Предмет поиска	Страна выдачи, вид и номер охранного документа, индекс МПК	Заявитель (патентообладатель), номер заявки, дата публикации	Название изобретения (полной модели образца)
1	2	3	4
Микродуговое оксидирование металлов вентильной группы	Россия, <i>RU 2 694 441 C1</i> , <i>C23C14/08(2006.01)</i> <i>C23C14/12(2006.01)</i> <i>B23H 9/00(2006.01)</i>	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет» (<i>RU</i>) 2 694 441, 15.07.2019	Способ получения толстослойных теплозащитных покрытий методом микродугового оксидирования на высококремнистом алюминиевом сплаве [7]

Продолжение таблицы 1.2.

1	2	3	4
Микродуговое оксидирование металлов вентильной группы	Россия, <i>RU</i> 2 616 146C1, <i>F02F3/10</i> (2006.01) <i>C25D11/04</i> (2006.01)	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет» (<i>RU</i>) Открытое акционерное общество «УФИМСКОЕ МОТОРОСТРОИТЕЛ ЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВЕНН ОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ» (<i>RU</i>) 2 616 146, 12.01.2017	Способ тепловой защиты поршня двигателя внутреннего сгорания из алюминиевых сплавов [8]

Продолжение таблицы 1.2.

1	2	3	4
Микродуговое оксидирование металлов вентильной группы	Россия, <i>RU 2 691 477 C1, C25D</i> 11/12(2006.01)	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» 2 691 477, 14.06.2019	Способ формирования многофункциональных терморегулирующих покрытий на изделиях из алюминиевых сплавов [9]
Микродуговое оксидирование металлов вентильной группы	Россия, <i>RU 2671311 C2, C25D11/02</i>	Акционерное общество «МАНЭЛ» 2016123306, 10.06.2016	Электролит для нанесения покрытия на вентильные металлы и их сплавы, способ нанесения покрытия и покрытие, полученное таким способом [10]

Продолжение таблицы 1.2.

1	2	3	4
Микродуговое оксидирование металлов вентильной группы	Россия, <i>RU 2607875 C2,</i> <i>C25D11/14</i>	Закрытое акционерное общество «МАНЭЛ» 2015111777, 31.03.2015	Способ нанесения керамического черного покрытия на вентильные металлы методом микродугового оксидирования и покрытие, полученное этим способом [11]
Микродуговое оксидирование металлов вентильной группы	Россия, <i>RU 165036 U1,</i> <i>F02F 3/10(2006.01)</i> <i>F02B</i> <i>77/02(2006.01)</i> <i>F16J 1/01(2006.01)</i>	Лебедев Дмитрий Александрович (<i>RU</i>) 165036, 27.09.2016	Поршень двигателя внутреннего сгорания с каталитически–активным термобарьерным керамическим покрытием на поверхности днища, юбки поршня и канавок поршневых колец [12]

На основании вышеизложенной информации можно сделать вывод, что:

– Защитные оксидно–керамические покрытия остаются одним из наиболее приоритетных способов защиты металлов от механических воздействий и коррозии. Это отмечено увеличением количества зарегистрированных патентов

за последние несколько лет в этой области исследований патентов и технической информации.

– Все большему внедрению технологии в промышленность способствуют повышенные свойства и характеристики получаемого защитного покрытия на металлах.

– Технологический уровень метода микродугового оксидирования вырос и продолжает расти, совершенствуясь как отдельными компонентами – электролитами, доступными материалами, так и самой технологией в целом. Это наблюдается в наличии патентов в данной области исследования.

2 Обоснование выбора материала и методы их исследования

В рамках выпускной квалификационной работы были выбраны алюминиевые деформируемые сплавы. Данные материалы сочетают в себе легкость с повышенной прочностью и пластичностью.

Деформируемые алюминиевые сплавы широко применяются для производства полуфабрикатов, таких как листы, профили и трубы, а также для изготовления различных деталей методом штамповки,ковки и прессования. Все эти сплавы можно разделить на две основные категории: термически упрочняемые и неупрочняемые. К первой группе относятся сплавы, содержащие алюминий с магнием и кремнием, а также с магнием и медью. Ко второй группе относятся сплавы, содержащие марганец, а также те, где марганец и магний. В соответствии с действующим ГОСТ 4784-2019 «Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки», маркировка осуществляется с помощью буквенных обозначений (например, АМ, АК, В, ВД, Д и т.д.), за которыми следует порядковый номер сплава, как, например, Д18.

Диаграммы для сплавов, которые содержат эвтектику, например, алюминий-кремний. Эвтектика придает сплавам высокую жидкотекучесть, поэтому сплавы правее линии эвтектики относятся к литейным.

Выделяют диаграммы для неупрочняемых и упрочняемых сплавов. Например, сплавы левее точки, где легирующий элемент образует однофазный твердый раствор не упрочняются термической обработкой, а сплавы правее этой точки – упрочняются. Это относится к деформируемым сплавам [13].

На рисунке 2.1 представлена диаграмма состояния алюминиевых сплавов. Легирование таких сплавов различными элементами приводит к характерному изменению диаграмм состояния: изменение температуры плавления и кристаллизации сплавов.

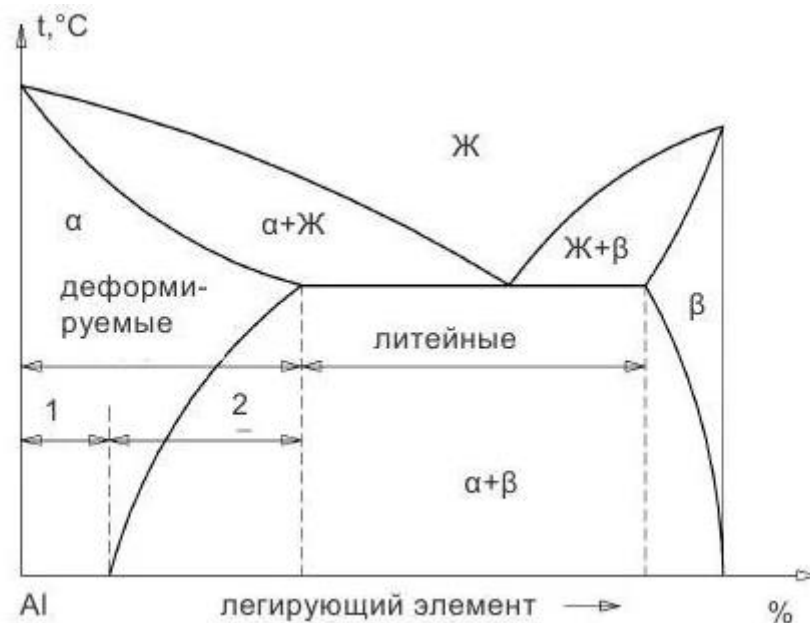


Рисунок 2.1 – Диаграмма состояния «алюминий - легирующий элемент»:
 1 – деформируемые, термически неупрочняемые сплавы; 2 – деформируемые, термически упрочняемые сплавы

К алюминиевым деформируемым сплавам относится дюралюминий, который также известен как дюралюмин или дуралюмин. Этот сплав принадлежит к группе алюминиево-литиевых сплавов на основе алюминия (содержит до 93%), меди (до 5%) и магния (до 3%), при этом часто добавляется марганец в количестве около 0,5%. Кремний и железо рассматриваются как естественные примеси. Дюралюминий после обработки закалкой или старением достигает прочности, сопоставимой со сталью, при этом обладая высокой устойчивостью к изменениям температуры. Поэтому он находит широкое применение в таких отраслях, как авиация, автомобилестроение и строительство. Наиболее популярные марки дюралюминия – это Д1 и Д16 (представленный на рисунке 2.2), причем вторая марка признана наиболее устойчивой к образованию трещин и активно используется для критически важных деталей и узлов в самолетостроении.



Рисунок 2.2 – Дюралюминий Д16Т

Авиали – это сплавы, относящиеся к системе Al-Mg-Si, в которых содержание алюминия может достигать до 98%, магния до 0,9%, а кремния до 1,2%. Также в этих сплавах присутствуют небольшие количества других легирующих элементов и примесей, таких как марганец, медь, железо и цинк. Основные марки авиалей – это АВ, АД31 и АД35. Сплавы данной группы характеризуются хорошей пластичностью, также после закалки и старения они удовлетворительно режутся и хорошо свариваются. Эти материалы широко используются в производстве велосипедных рам, корпусов мобильных телефонов, лопастей вертолетов и деталей, работающих в условиях средней нагрузки. Классификация по уровню нагрузки объясняется тем, что по прочности авиационный алюминий уступает дюралюминиевым сплавам, как и по способности выдерживать температурные колебания.

Высокопрочные сплавы, такие как марки В95 и В96, образованы на основе соединения алюминия с цинком, магнием и медью [14]. Как уже следует из названия, эти сплавы обладают выдающейся устойчивостью к разрывам, а их удельная прочность превосходит многие среднелегированные стали. В их горячем состоянии высокопрочные алюминиевые сплавы обладают достаточной пластичностью, что делает их незаменимыми при производстве детально нагруженных элементов, таких как элементы крыла самолета и шпангоуты

морских судов. Однако у них есть некоторые недостатки: например, они чувствительны к воздействию низких температур и подвержены коррозии при наличии напряжений.

Ковочные сплавы представляют собой пластичные и устойчивые к образованию горячих трещин алюминиевые сплавы на основе Al-Si-Mg-Cu, маркированные как АК, с добавлением номера – АК1, АК3, АК8 и так далее. Самая высокая прочность среди ковочных алюминия наблюдается у марки АК8, из которой производят нагруженные узлы, такие как лопасти вертолетов и подрамники моторов. Тем не менее, эта марка обладает низкой технологичностью, что связано с повышенным содержанием меди в ее составе. Для создания фигурных или высокоточных деталей средней прочности, таких как крепежи или фитинги, чаще всего используется сплав АК5. Следует отметить, что сплавы алюминия АК5, а также дюралюмины типа Д20 и Д21 относятся к жаропрочным материалам, и именно из них изготавливают головки цилиндров и детали для турбореактивных двигателей [3].

Для проведения выпускной квалификационной работы был выбран алюминиевый деформируемый сплав 5083Н111 с повышенным содержанием магния. Данный сплав широко применяется в промышленности благодаря сочетанию термостойкости, прочности и коррозионной стойкости. Химический состав материала приведен в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Химический состав 5083Н111

Химические элементы	Cr	Cu	Fe	Mg	Ti	Mn	Si	Zn	Al	Примеси
Массовая доля, %	до 0,25	до 0,1	до 0,4	до 4,9	до 0,15	до 1,0	до 0,4	до 0,25	до 92,4	прочих 0,15

Сплав 5083Н111 обладает высокой коррозионной стойкостью в морской воде и агрессивных средах, из-за чего получил широкое применение в судостроении. Из него изготавливают корпуса судов, палубных покрытий и

внутренних перегородок. В авиационной промышленности изготавливают силовые конструкции, а в машиностроении – рамы, кузова, прицепы, вагоны и сосуда. Помимо перечисленных отраслей, в химической промышленности из сплава 5083Н111 встречаются резервуары, трубопроводы и емкости для агрессивных сред, а в строительстве – несущие конструкции мостов, рекламные щиты, облицовочные панели. Такое широкое применение обусловлено универсальными механическими свойствами, приведенными в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Механические свойства материала 5083Н111

Характеристика материала	Значение
Плотность, ρ , кг/м ³	2700,0
Коэффициент линейного расширения, α , 1/Град	23,5
Предел прочности при растяжении, σ_b , МПа	345,0
Теплопроводность, λ , Вт/м·К	229,0
Твердость по Бринеллю, HB макс.	93,0
Модуль упругости, E , МПа	69000,0
Относительное удлинение при разрыве, δ , %	10,0

2.1 Определение толщины и пористости

Определение толщины оксидного слоя на образцах можно определить прямым измерением на поперечных шлифах (на микроскопе).

Пористость определяли по стандартным методикам.

Глубина пор может достигать материала подложки. Однако, большинство пор могут не достигать основного материала несквозная (объемная) пористость оценивается по формуле:

$$\beta = m_2 - m_1 / m_1 - m_3 \cdot \rho_{ок} / \rho_m \cdot 100, \quad (1.1)$$

где m_1 – масса образца после окисления, г;

m_2 – масса образца после одночасовой выдержки в полиэтилсилоксановой жидкости или веретенном масле, г;

m_3 – масса образца после удаления оксидного слоя, г;

$\rho_{ок}$ – объемная плотность слоя (принимается равной плотности соединения, присутствующего в большей степени в оксидном слое, кг/м³);

ρ_m – плотность полиэтилсилоксановой жидкости, равная 950 кг/м³, или веретенного масла, равная 900 кг/м³ [2].

2.2 Определение фазового состава и теплопроводности

Современные методы анализа материалов включают комплексный подход к изучению их структуры и состава. Среди наиболее информативных методик следует выделить электронную микроскопию (ЭМ) и рентгеновский микроанализ (РМА), которые позволяют исследовать поверхность материалов с беспрецедентной детализацией. Эти методы обеспечивают увеличение до 30000 крат, что значительно превосходит возможности оптической микроскопии, а также обладают исключительной глубиной резкости, превышающей аналогичный параметр оптических систем в сотни раз.

Применение ЭМ и РМА охватывает широкий спектр материалов - от металлов и керамики до тонких и толстых конденсированных пленок различного назначения. Особое значение имеет метод растровой электронной микроскопии (РЭМ), реализуемый с помощью специализированного оборудования, такого как электронно-зондовый микроанализатор JCXA-733 "Super probe" производства JOEL. Принцип работы РЭМ основан на анализе взаимодействия ускоренных электронов (с энергией свыше 10 кэВ) с поверхностью исследуемого материала. Это взаимодействие вызывает множество вторичных процессов, включая:

- Эмиссию вторичных электронов.
- Генерацию тормозного и характеристического рентгеновского излучения.
- Явление катодolumинесценции.
- Поглощение и рассеяние первичных электронов.

- Возникновение наведенных токов

Каждый из этих процессов содержит ценную информацию о свойствах и структуре анализируемого материала.

Ключевым преимуществом РЭМ является возможность исследования большинства образцов без сложной предварительной подготовки. Единственное ограничение связано с габаритами образца, который должен помещаться на предметный столик микроскопа. Однако при работе с диэлектрическими материалами или образцами с высоким удельным сопротивлением возникают специфические трудности. Основная проблема заключается в накоплении поверхностного заряда при облучении электронным пучком, что приводит к неконтролируемому отклонению первичного пучка, искажению получаемого изображения и изменению характеристик вторичной электронной эмиссии [16].

Для устранения эффекта зарядки наиболее распространенным решением является нанесение тонкого проводящего покрытия. В практике применяются два основных метода:

- Термическое напыление в вакууме.
- Катодное распыление.

Оптимальная толщина проводящего слоя составляет 10-100 нм, при этом он должен быть сплошным для обеспечения эффективного стекания заряда. Например, для алюминиевых композиционных материалов используют серебряные покрытия толщиной 20-30 нм, наносимые вакуумным термическим напылением. Стандартные параметры работы микроанализатора включают:

- Ускоряющее напряжение 20 кВ.
- Ток электронного зонда 0,5 нА.
- Диаметр зонда 0,50 мкм.

Для точного определения фазового состава оксидных слоев применяют рентгеноструктурный фазовый анализ. Этот метод основан на уникальности кристаллической структуры каждой фазы, которая характеризуется специфическим набором межплоскостных расстояний (d). Анализ этих расстояний позволяет однозначно идентифицировать кристаллическую решетку и определить тип вещества.

При проведении рентгеноструктурного анализа каждая кристаллическая фаза дает характерную дифракционную картину, определяемую:

- Положением дифракционных линий.
- Интенсивностью отражения.
- Угловыми характеристиками.

Формирование дифракционных линий происходит при отражении рентгеновских лучей от кристаллографических плоскостей. Расчет межплоскостных расстояний выполняется по формуле Вульфа-Брэгга, где используются известные значения длины волны излучения (λ) и экспериментально измеренные углы отражения. Этот подход обеспечивает точную идентификацию фазового состава исследуемых материалов. Условия проведения эксперимента для композиционных материалов на основе алюминия: съемку проводят на рентгеновском дифрактометре общего назначения ДРОН-3М с использованием рентгеновской трубки с медным анодом БСВ-27ПСи. Применение фильтрации первичного рентгеновского пучка дифференциальным фильтром, изготовленным из никелевой фольги, толщиной 0,05 мм позволяет работать в CuK_α излучении (без примеси линии CuK_β излучения). Условия съемки дифрактограммы: длина волны рентгеновского излучения - 1,5418 Å; ускоряющее напряжение - 40 кВ; ток анода (рентгеновской трубки) - 40 мА; коллиматоры пучка - щели: соллера, №1 – 4 мм; №2 - 0,25 мм; №3 - 0,25 мм; №4 – 6 мм; диапазон скорости счета 1/100 имп/с; постоянная времени - 1...2,5; скорость вращения счетчика - 0,5 град/мин; шаг метки - 1 град; скорость диаграмной ленты - 300 (720) мм/ч; съемка с вращением образца [19].

Количественное определение содержания найденных фаз (Al_2O_3) проводят методом сравнения с эталонными образцами. Определение процентного содержания проводят с применением эталонов данных фаз, в связи с чем, погрешность при проведении измерений не превышает $\pm 1,5\%$ [17].

Теплопроводность оценивали с помощью коэффициента теплопроводности по методу лазерной вспышки на соответствующем оборудовании LFA427/7/G с предварительной очисткой поверхности образцов

для лучшего поглощения теплового импульса. Данный вид исследования предполагает, что образец ограничен в держателе с обеих сторон параллельными поверхностями [19].

3 Экспериментальная часть

Получение композиционных материалов методом микродугового оксидирования с необходимыми свойствами учитывает такие факторы, как:

- Состав основного материала подложки.
- Состав и температура электролита.
- Электрические параметры процесса (сила тока, напряжение, плотность тока, род тока).
- Время обработки.

Для проведения практических исследований был выбран алюминиевый деформируемый сплав 5083Н111. Известно, что данный материал склонен при нагревании к межкристаллитной коррозии, следовательно, данный сплав остается не задействованным во многих отраслях промышленности. С помощью микродугового оксидирования становится возможным понижение значения теплопроводности за счет формирования более устойчивой оксидной пленки и получении композиционного материала с необходимыми теплофизическими свойствами.

Полученные образцы из сплава алюминия 5083Н111 подвергались дополнительной механической обработке для устранения нарушившихся поверхностных слоев. Обработка проводилась методом зачистки наждачной бумагой, переходя от крупного зерна к более мелкому. После чего проводилось обезжиривание поверхности с целью устранения жиров и органического происхождения.

3.1 Выбор режимов обработки и подготовка электролитов для микродугового оксидирования

Технология получения защитных оксидных слоев на деформируемых алюминиевых сплавах в условиях электрохимической обработки включает, помимо параметров или режимов микродугового оксидирования, выбор электролита. Состав и природа электролитов, в которых можно получить

качественные оксидные слои, во многом определяются свойствами обрабатываемого металла [21].

Как отмечается в литературном обзоре, процесс формирования оксидного слоя при МДО представляет собой чередование стадий: доискрового оксидирования, искрения, микродуговой и дуговой. Смена стадий сопровождается изменением характера осаждения компонентов электролита; поэтому для понимания механизма роста микроплазменного оксидного слоя представляет интерес изучение участия компонентов электролита в его формировании. Выбор электролитов осуществлялся по принципу включения веществ с разной степенью дисперсности: ионных, коллоидных и мелкодисперсных. Такой подход к изучению механизма МДО объясняется тем, что успешное формирование качественных композитов, по-видимому, связано с формированием в электролите определенных структур, непосредственно участвующих в росте оксидного слоя. Это подтверждается тем фактом, что в электролитах, имеющих одинаковый химический состав, но разное строение компонентов, для искрообразования требуется разная плотность поляризующего электрического тока, а в ряде случаев процесс не протекает.

При проведении комплексных исследований технологии МДО деформируемых алюминиевых сплавов одним из условий выбора электролитов, помимо требований к способности формировать композиционные материалы с высокими и эксплуатационными, и физико-механическими характеристиками, было требование к экологичности, безопасности, а также доступности и относительно низкими затратами на ее эксплуатацию и приобретение химикатов. Наиболее перспективными с этой точки зрения являются силикатные электролиты, представленные в таблице 3.1, не содержащие вредных для здоровья добавок, например, солей тяжелых металлов. А отработанные сбрасываемые растворы достаточно разбавить, чтобы они удовлетворяли требованиям санитарных норм. В то же время, изменяя режим МДО, можно в широких пределах варьировать свойства композиционных материалов, так как применяемые для микродугового оксидирования силикатные электролиты

обычно имеют pH около 10. При этом одновременно снижается концентрация примесей, перешедших в ванну с катода [18].

Таблица 3.1 – Химический состав электролитов для МДО

Электролит	Концентрация компонентов электролита г/л		
Раствор 1 (силикатно-щелочной)	Na ₂ SiO ₃	КОН	ZrO ₂
	4...5	5...6	30...40
Раствор 2 (алюминатный)	NaAlO ₂	Na ₂ SO ₄	Na ₂ B ₄ O ₇ , 10H ₂ O
	4...8	8...12	6...8

Помимо растворов электролитов, были подобраны оптимальные параметры оксидирования для каждого из них, они приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Режимы обработки образцов из сплава 5083Н111

Электролит	Время обработки τ , мин	Режимы обработки			
		Плотность тока j , А/дм ²	Напряжение U , В	Температура электролита t , °С	Род тока
Раствор 1	6...15	15...20	380...420	18...40	переменный
Раствор 2	4...10	25...30	300...320	18...20	постоянный

Выбранные параметры для микродугового оксидирования должны обеспечиваться надежным оборудованием. Эксперименты по получению образцов проводились на установке УМДО-50А. Установка представлена на рисунке 3.1.

Данная установка предназначена для получения различных функциональных покрытий на металлах вентильной группы, в том числе, биологически инертных развитых поверхностей для имплантируемых конструкций, а так же для выполнения электрохимического полирования различного вида износостойких, коррозионостойких и термостойких оксидокерамических покрытий деталей.

Основные технические характеристики:

- питание установки от трехфазной сети переменного напряжения, U_{Π} (линейное напряжение) – 380 В;
- максимальный средний ток анода при линейном характере сопротивления нагрузки и напряжении на нагрузке до 270 В, $I_{A\text{MAX}} - 50 \text{ A}$;
- дискретность установки тока анодирования, $d I_{A\text{MAX}} - 0,01 \cdot I_{A\text{MAX}}$;
- максимальное амплитудное значение напряжения на аноде, U_A – в режиме постоянного тока – до 530 В – при существенно нелинейном характере нагрузки в режиме переменного тока – до 800 В;
- питание цепи анодирования в режиме: переменного тока переменным напряжением частотой от 50 Гц до 380 В; постоянного тока выпрямленным напряжением частотой от 100 Гц до 380 В;
- кнопочное управление коммутацией токоограничительных конденсаторов с помощью цифрового блока управления;
- измерение среднего тока оксидирования с помощью стрелочного индикатора;
- измерение амплитудного напряжения на аноде и катоде с помощью стрелочного индикатора;
- рабочий объем электролитической ванны не более 2 л.;
- срок службы установки – 5 лет.



Рисунок 3.1 – Установка УМДО-50А

Помимо этого, для рациональных условий проведения обработки необходимо, чтобы площадь катода превышала площадь анода примерно в 2 раза. Это будет обеспечивать качество поверхности образца и равномерность толщины нанесенного оксидного слоя.

После анализа проведения обработки микродуговым оксидированием для получения качественного покрытия образца были выявлены следующие рекомендации по улучшению технологии нанесения. Для уменьшения воздействия вредных испарений электролита необходимо наличие местной вентиляции. Во избежание перегрева и растравливания образца необходимо проводить охлаждение электролита через «рубашку», как представлено на рисунке 3.2. Так же для устранения местного перегрева образца требуется установка механической мешалки с частотой вращения до 800 об/мин.

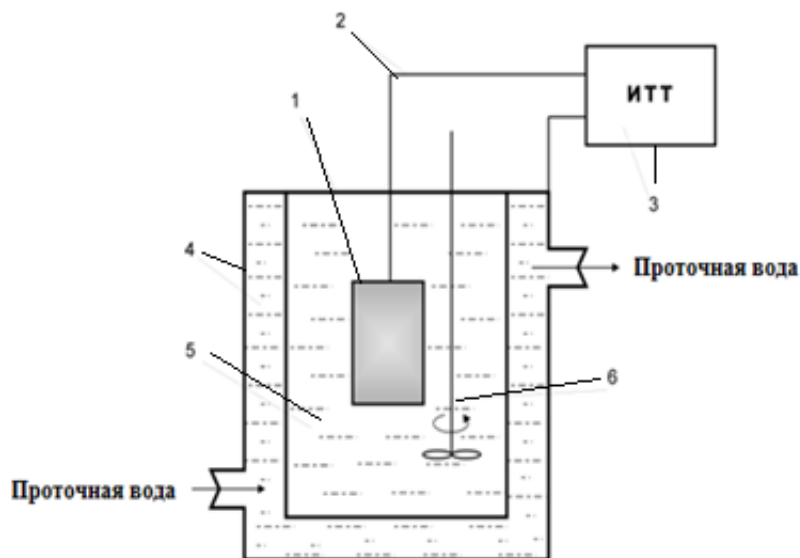


Рисунок 3.2 – Схема охлаждения электролитической ванны проточной водопроводной водой при МДО: 1 – обрабатываемая деталь; 2 – токоподводящий кабель; 3 – источник питания; 4 – система охлаждения «рубашка»; 5 – электролит; 6 – система перемешивания электролита

Если необходимо нанести оксидокерамическое покрытие на определенную часть детали, то нежелательные к обработке поверхности необходимо изолировать.

3.2 Исследование теплофизических свойств композиционных материалов

Исследование теплофизических свойств материалов является одной из ключевых задач в области материаловедения. Это особенно актуально для композиционных материалов, которые находят широкое применение в различных отраслях, включая авиацию, автомобилестроение и строительство. Микродуговое оксидирование представляет собой особую технологию, позволяющую улучшать характеристики алюминиевых сплавов, таких как прочность, коррозионная стойкость и термическая стабильность.

Для исследования были использованы образцы алюминиевого сплава 5083Н111, которые подвергались обработке методом микродугового оксидирования. Процесс оксидирования проводился в специальной среде.

Оценивалась толщина и пористость полученных покрытий в двух растворах электролитов. Толщина определялась методом микроструктурного анализа на металлографическом микроскопе Альтами МЕТ 6. Микроструктура полученных образцов из алюминиевого деформируемого сплава 5083Н111 при различном времени в силикатно-щелочном электролите представлена на рисунке 3.3.

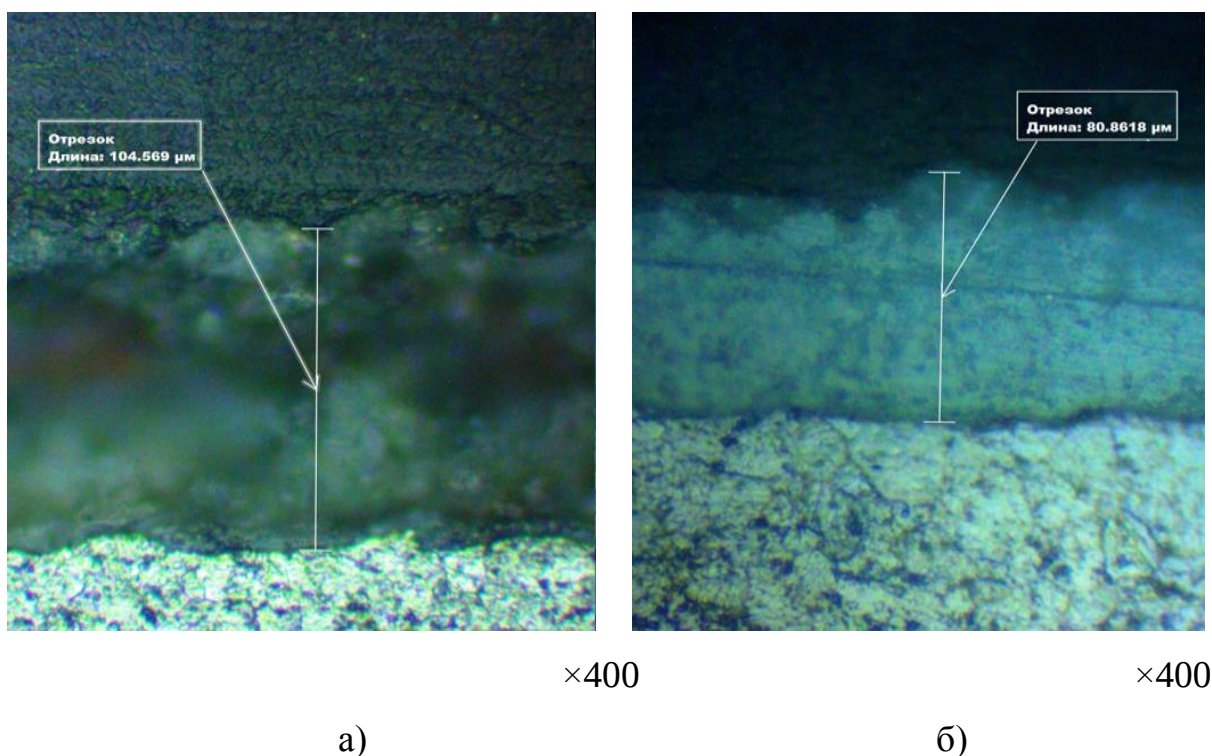


Рисунок 3.3 – Микроструктура шлифов композиционного материала на основе 5083Н111 после МДО в различных электролитах в 400 кратном увеличении: а) – в силикатно-щелочном электролите, б) – в алюминатном электролите

Данные снимки микроструктуры композиционного материала показывают, что толщина оксидного слоя, полученного в силикатно-щелочном электролите, составляет примерно 105 мкм, а в алюминатном электролите – 81 мкм.

В ходе исследования образец под буквой а) обрабатывался в силикатно-щелочном электролите от 6 до 15 минут, а под буквой б) от 4 до 10 минут. Параметры МДО для обработки представлены в таблице 3.2.

Проводившаяся обработка материала в алюминатном и силикатно-щелочном электролите и подобранные параметры МДО были выбраны исходя из обеспечения условий целостности оксидного покрытия, его адгезии с материалом-подложкой 5083Н111 и исключения кипения электролита. Помимо этого установлено, что электролит требует постоянного охлаждения для недопущения его перегрева и, как следствие, разложения. При повышении температуры свыше 35 °С происходит потеря его функциональных свойств.

В ходе исследования было выявлено, что при определенных значениях времени микродугового оксидирования толщина покрытий увеличивалась при повышении плотности тока и составила от 40 до 100 мкм, в свою очередь пористость покрытия изменялась от 6 до 20 %. При этом повышение температуры электролита на пористость и толщину покрытия влияния не оказывают. Помимо этого на толщину оксидного слоя влияет продолжительность обработки. При увеличении времени МДО происходит увеличение толщины и пористости получаемых покрытий. При проведении процесса свыше 15 минут замечено, что образовавшееся покрытие имеет неоднородности, проявляются местные наросты, а на острых кромках образцов происходит разрушение оксидного слоя.

Результаты исследования приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Толщина и пористость МДО-покрытий на алюминиевом деформируемом сплаве 5083Н111 при различном времени обработки

Характеристика покрытия	Раствор 1 (силикатно-щелочной)				Раствор 2 (алюминатный)			
	Режимы обработки							
	$j=20 \text{ А/дм}^2, t=20...25 \text{ }^\circ\text{C}$				$j=30 \text{ А/дм}^2, t=18...20 \text{ }^\circ\text{C}$			
	Продолжительность обработки τ , мин							
	6	9	12	15	4	6	8	10
Толщина δ , мкм	40...55	75...80	85...90	115...130	25...27	37...44	62...66	80..85
Пористость, %	4...6	7...10	10...12	15...20	4...5	7...10	11...14	15...19

Доказано, что композиционные оксидокерамические покрытия можно использовать в качестве теплозащитных, так как полученные значения теплопроводности композиционных материалов оказались несколько больше значений теплопроводности сплава-основы 5083Н111. Теплопроводность оценивали с помощью коэффициента теплопроводности по методу лазерной вспышки на соответствующем оборудовании *LFA427/7/G* с предварительной очисткой поверхности образцов для лучшего поглощения теплового импульса. Данный вид исследования предполагает, что образец ограничен в держателе с обеих сторон параллельными поверхностями [19].

На основании исследований построен график зависимости средних значений коэффициента теплопроводности композиционных материалов от состава электролита, представленный на рисунке 3.4.

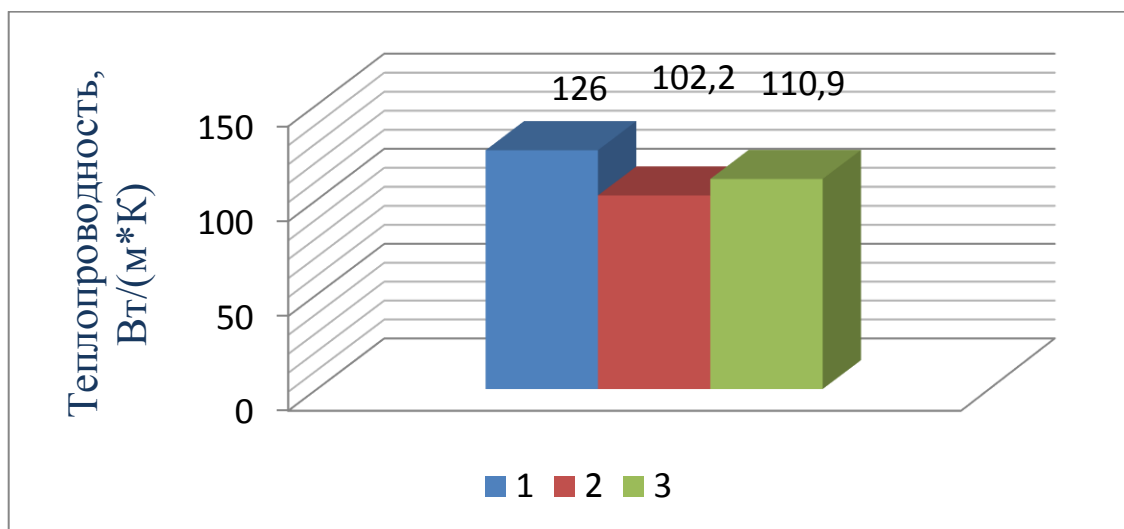


Рисунок 3.4 – Зависимости средних значений коэффициента теплопроводности композиционных материалов от состава электролита:
1 – 5083Н11; 2 – 5083Н111+МДО (раствор 1); 3 – 5083Н111+МДО (раствор 2)

Из полученных значений видно, что после проведения микродугового оксидирования наблюдается значительное снижение λ композиционных материалов в сравнении с λ материала основы на 20 % и составило 102,2 Вт/(м·К) в силикатно-щелочном растворе, а в алюминатном на 13 % и составило 110,9 Вт/(м·К). Большее снижение коэффициента теплопроводности композиционного материала, полученного в силикатно-щелочном электролите, связано с большей толщиной формируемых в нем оксидокерамических покрытий [20].

Таким образом, результаты исследования теплопроводности композиционных материалов на основе алюминиевого деформируемого сплава 5083Н111 показывает существенное влияние на значение коэффициента теплопроводности наличие оксидокерамического композиционного слоя. Показана эффективность использования технологии микродугового оксидирования для создания теплозащитных МДО-покрытий при изготовлении изделий на основе алюминия и его сплавов. Наличие пористого оксидного слоя приводит к общему снижению теплопроводности композиционного материала по сравнению с материалом основы.

Заключение

В выпускной квалификационной работе рассмотрен эффективный способ получения защитных покрытий микродуговым оксидированием. Данный метод является прогрессивным, т.к. позволяет получить покрытия с высоким комплексом физико–механических и эксплуатационных свойств. Выявлены основные преимущества и недостатки МДО. В рамках работы были рассмотрены 2 вида электролитов.

Рассмотрены методы исследования композиционных металлокерамических материалов: определение теплопроводности, фазового состава, определение пористости и толщины.

Установлено, что композиционные материалы, полученные в алюминатном электролите на 13% менее теплопроводны ($110,9 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$), чем материал основы ($126 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$), а композиционные материалы, полученные в силикатно-щелочном электролите на 20% ($102,2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$).

Получены и исследованы образцы композиционных материалов на основе алюминиевого деформируемого сплава 5083Н111. Показана эффективность использования технологии микродугового оксидирования для создания теплозащитных композиционных МДО-покрытий при изготовлении изделий на основе алюминия и его сплавов. Наличие пористого оксидного слоя приводит к общему снижению теплопроводности композиционного материала по сравнению с материалом основы, что вероятно связано с низкой теплопроводностью формируемых оксидокерамических покрытий. Таким образом поставленные задачи решены, а цель выпускной квалификационной работы достигнута.

Список используемых источников

- 1 **Технология микродугового оксидирования (МДО–покрытия) и покрытия на ее основе** [Электронный ресурс]: статья / [сайт] URL <https://integral-russia.ru/2018/04/29/tehnologiya-mikrodugovogo-oksidirovaniya-mdo-pokrytiya-i-pokrytiya-na-ee-osnove/> (дата обращения 26.04.2025).
- 2 **Исследование физико–механических свойств, структуры и фазового состава покрытий, полученных методом микродугового оксидирования** [Текст]: учебное пособие / С.В. Жуков, О.А. Кантаева, Р.В. Желтухин – Москва: Приборы. – 2008
- 3 **Материаловедение** [Текст]: учебное пособие / Солнцев Ю.П., Пряхин Е.И., Войткун Ф. – Москва: МИСиС, 1999. – 477 с.
- 4 **Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование)** [Текст]: учебное пособие / И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд, В.Б. Людин, Б.Л. Крит, А.М. Борисов – Москва: ЭКОМЕТ, 2005. – 368 с.
- 5 **Яндекс. Патент** [Электронный ресурс]: [сайт]. URL <https://yandex.ru/patents> (дата обращения: 10.04.2025).
- 6 **Федеральный институт промышленной собственности** [Электронный ресурс]: [сайт]. URL <https://www1.fips.ru/> (дата обращения: 10.04.2025).
- 7 **Способ получения толстослойных теплозащитных покрытий методом микродугового оксидирования на высококремнистом алюминиевом сплаве** [Электронный ресурс]: пат. 2694441 Рос. Федерация: МПК C25D 11/06 Н.Ю. Дударева, Р.Д. Еникеев, Р.С. Валеев; заявитель и патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет» – № 2018135146, заявл. 04.10.2018; опубл. 15.07.2019, Бюл. № 20 – 3 с. [сайт]: URL: <https://www1.fips.ru/> (дата обращения: 10.04.2025).
- 8 **Способ тепловой защиты поршня двигателя внутреннего сгорания из алюминиевых сплавов** [Электронный ресурс]: пат. 2616146 Рос. Федерация: МПК F02F 3/10, C25D 11/04 Н.Ю. Дударева, И.А. Бутусов, Р.В.

Кальщиков; заявитель и патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет» – № 2016100895, заявл. 12.01.2016; опубл. 12.04.2017, Бюл. № 11 – 3 с. [сайт]: URL: <https://www1.fips.ru/> (дата обращения: 10.04.2025).

9 Способ формирования многофункциональных терморегулирующих покрытий на изделиях из алюминиевых сплавов [Электронный ресурс]: пат. 2691477 Рос. Федерация: МПК C25D11/12 К.А. Аникин, А.М. Борисов, А.В. Желтухин; заявитель и патентообладатель федеральное государственное автономное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» № 2018106345, заявл. 09.04.2018; опубл. 14.06.2019, Бюл. № 34 – 6 с. [сайт]: URL: <https://www1.fips.ru/> (дата обращения: 10.04.2025).

10 Электролит для нанесения покрытия на вентильные металлы и их сплавы, способ нанесения покрытия и покрытие, полученное таким способом [Электронный ресурс]: пат. 2671311 Рос. Федерация: МПК C25D 11/02 П.И. Бутягин, С.С. Арбузова, А.В. Большанин; заявитель и патентообладатель акционерное общество «МАНЭЛ» № 2010108580/02, заявл. 10.06.2016; опубл. 31.10.2018, Бюл. № 23 – 2 с. [сайт]: URL: <https://www1.fips.ru/> (дата обращения: 10.04.2025).

11 Способ нанесения керамического черного покрытия на вентильные металлы методом микродугового [Электронный ресурс]: пат. 2607875 Рос. Федерация: МПК C25D 11/14 П.И. Бутягин, А.В. Большанин, С.С. Сафронова; заявитель и патентообладатель закрытое акционерное общество «МАНЭЛ» № 2015111777, заявл. 31.03.2015; опубл. 20.01.2017, Бюл. № 2 – 6 с. [сайт]: URL: <https://www1.fips.ru/> (дата обращения: 10.04.2025).

12 Поршень двигателя внутреннего сгорания с каталитически-активным термобарьерным керамическим покрытием на поверхности днища, юбки поршня и канавок поршневых колец [Электронный ресурс]: пат. 165036 Рос. Федерация: МПК F02F 3/10, F02B 77/02, F16J 1/01 Д.А. Лебедев,

М.Б. Иванов; заявитель и патентообладатель Д.А. Лебедев №2015138549/06, заявл. 10.09.2015; опубл. 27.09.2016, Бюл. № 27 – 4 с. [сайт]: URL: <https://www1.fips.ru/> (дата обращения: 10.04.2025).

13 Электрохимические и электролитноплазменные методы модификации металлических поверхностей: материалы III Международной научно–технической конференции [Текст]: сборник тезисов конференции / Нечаев Г.Г., Попова С.С. – Кострома: КГУ им. Н.А. Некрасова, 2010. – 295 с.

14 Технология нанесения и свойств покрытий [Текст]: курс лекций / Ю.Е. Спектор, Р.Г. Еромасов – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2008. – 271 с.

15 Влияние режимов микродугового оксидирования на свойства формируемой поверхности [Текст]: учебное пособие / Н.Ю. Дударева – Уфа: УГАТУ, 2013. – 222 с.

16 Применение поверхностного упрочнения алюминиевых сплавов и покрытий для повышения коррозионно-механической стойкости деталей нефтепромыслового оборудования [Текст]: учебное пособие / Л.С. Саакян, А.П. Ефремов, Л.Я. Ропяк А.В. Эпельфельд – Москва: ВНИИОЭНГ, 1986. – 60 с.

17 Металловедение [Текст]: учебное пособие / А.П. Гуляев – Москва: Металлургия, 1978. – 646 с.

18 Справочник по анодированию [Текст]: учебное пособие / Е.Е. Аверьянов – Москва: Машиностроение, 2005. – 368 с.

19 Исследование температуропроводности с помощью прибора LFA427 [Текст]: учебное пособие / В.А. Юдин, Н.Е. Фомин, М.А. Окин – Саранск: Издательство Национального исследовательского Мордовского государственного университета, 2013. – 152 с.

20 Исследование теплопроводности тонких пленок диоксида циркония и сложных оксидов на основе диоксида циркония [Текст]: учебное пособие / М.А. Костюнина, М.Ю. Абашева, И.А. Митяева, Н.Ю. Снежко, Т.А. Енютина – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2011. – 430 с.

21 Технология нанесения и свойства покрытий [Текст]: курс лекций
/ Ю.Е. Спектор, Р.Г. Еромасов – Красноярск: Сибирский федеральный
университет, 2008. – 271 с.

Приложение



Министерство образования и науки РФ
ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»
Кафедра «Сварочное, литейное производство и материаловедение»

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
на тему:

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ,
ПОЛУЧЕННЫХ МИКРОДУГОВЫМ ОКСИДИРОВАНИЕМ**

Выполнил: ст.гр.21МТ1

Шайлообеков Ж.У.

Руководитель: к.т.н., доцент

Кривенков А.О.

Пенза 2025

Цель и задачи исследования

Целью данной работы является создание композиционных металлокерамических материалов на основе алюминиевых сплавов и исследование их теплофизических свойств.

Задачами являются:

- а) провести анализ классификации защитных покрытий, а так же методов их получения
- б) выбрать метод получения покрытий и дать его характеристику;
- в) произвести выбор материалов для формирования защитного покрытия;
- г) выбрать методы исследования свойств композиционных металлокерамических материалов;
- д) получить образцы металлокерамических композиционных материалов методом микродугового оксидирования на рациональных режимах;
- е) провести исследование теплофизических свойств, полученных материалов.

Схема и пример оксидокерамических покрытий

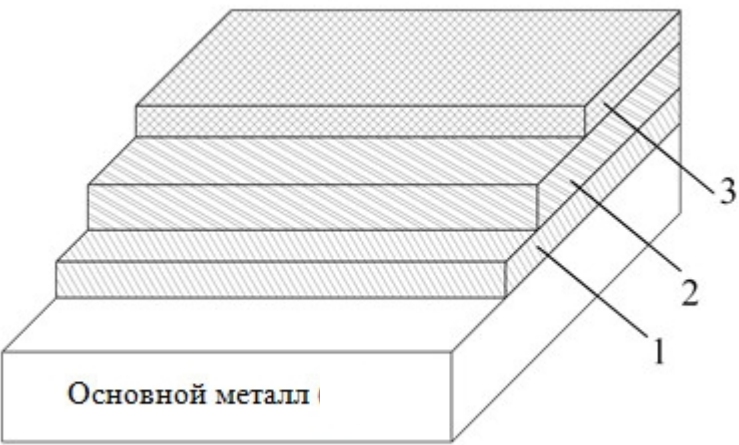


Рисунок 1 - Структура оксидокерамических покрытий: 1-тонкий переходный слой, 2- основной рабочий (корунд $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$), 3- технологический (алюмосиликаты)

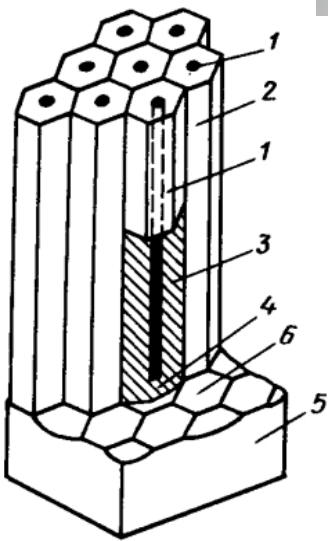
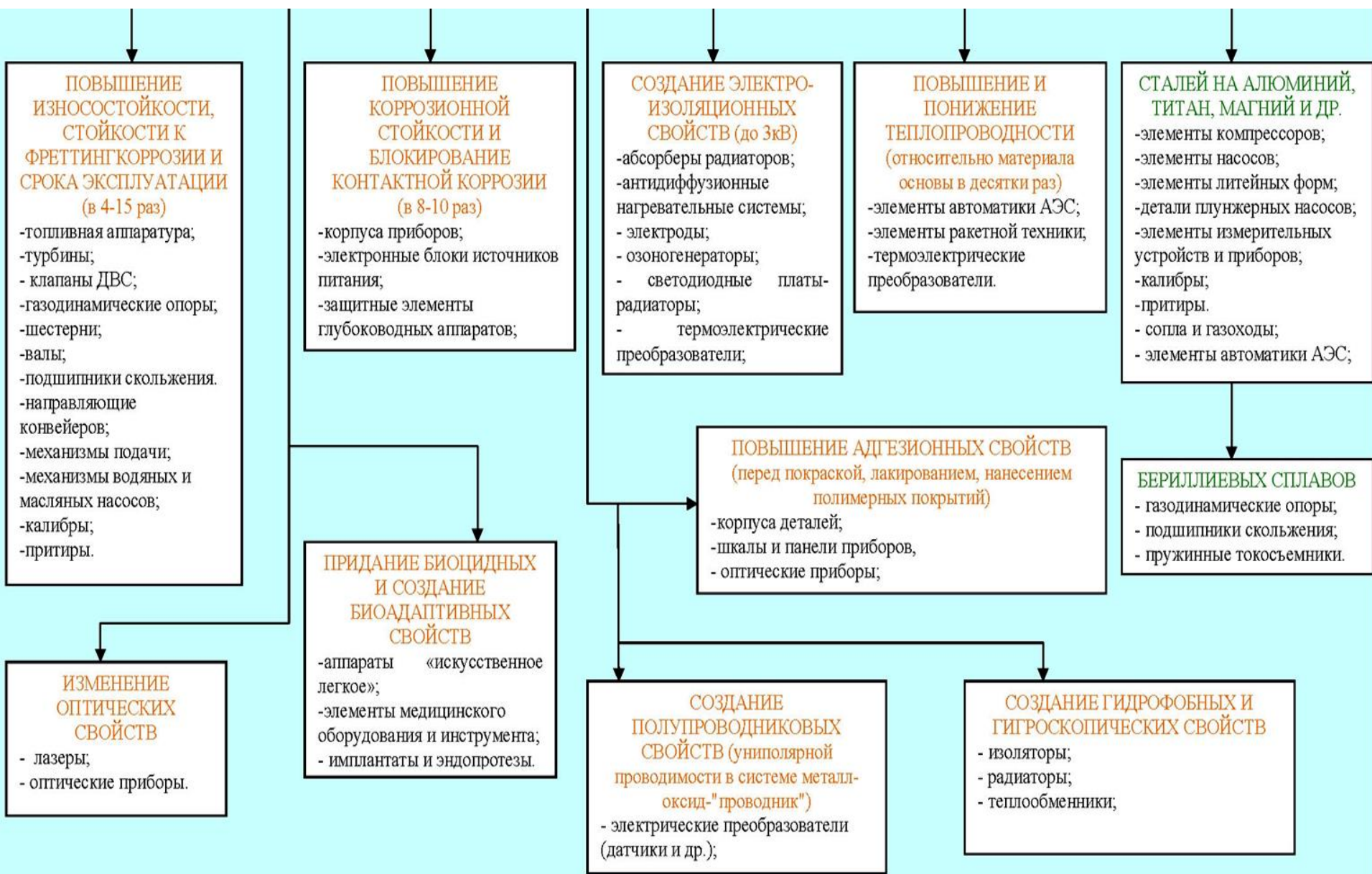


Рисунок 2 - Схема модели утолщенной оксидной пленки



Рисунок 3 - Торцевые уплотнения (сальники) холодильных компрессоров

Свойства МДО-покрытий и области их применения



Режимы микродугового оксидирования и применяемые электролиты

Режимы микродугового оксидирования классифицируются по следующим типам:

- а) по роду тока ;
- б) по полярности приложенного напряжения;
- в) по изменению электрических параметров;
- г) по характеру разряда;
- д) по степени управления;
- е) по способу формирования заряда (мягкий, мягко-жесткий, жесткомягкий, жесткий).

Основные группы электролитов

1 группа	2 группа
Электролиты, не содержащие элементов, способных образовывать нерастворимые оксиды	Электролиты, включающие элементы, способные образовывать нерастворимые оксиды, которые инкорпорируются в состав покрытия
Пример: растворы серной кислоты или едкого калия	Пример: алюминатно- и силикатно - щелочные растворы

Область применения алюминиевых деформируемых сплавов

Марка сплава	Свойства сплава	Область применения
АМц, АМцС	Нетермообрабатываемые сплавы.	Для изготовления химического оборудования; сосудов, работающих под давлением, резервуаров, кухонной посуды.
5083Н 111	Нетермообрабатываемые	Для изготовления сварных резервуаров, работающих под давлением; телевизионных и буровых вышек; транспортного оборудования; деталей ракет; для изготовления полуфабрикатов методом горячей или холодной деформации.
АК6	Термообрабатываемый, ковочный, обладающий высокой пластичностью в горячем состоянии.	Для изготовления штамповок компрессоров реактивных двигателей и других сложных по форме деталей, работающих при повышенных температурах.

Физико-механические свойства алюминиевого деформируемого сплава 5083H111

Характеристика материала	Значение
Плотность, ρ , кг/м ³	2700,0
Коэффициент линейного расширения, α , 1/Град	23,5
Предел прочности при растяжении, σ_b , МПа	345,0
Теплопроводность, λ , Вт/м·К	229,0
Твердость по Бринеллю, HB макс.	93,0
Модуль упругости, E, МПа	69000,0
Относительное удлинение при разрыве, δ , %	10,0

Химический состав электролитов и параметры микродугового оксидирования для композиционных материалов на основе сплава 5083Н111

Электролит	Концентрация компонентов электролита г/л		
Раствор 1 (силикатно-щелочной)	Na ₂ SiO ₃	КОН	ZrO ₂
	4-5	5-6	30-40
Раствор 2 (алюминатный)	NaAlO ₂	Na ₂ SO ₄	Na ₂ B ₄ O ₇ , 10H ₂ O
	4-8	8-12	6-8

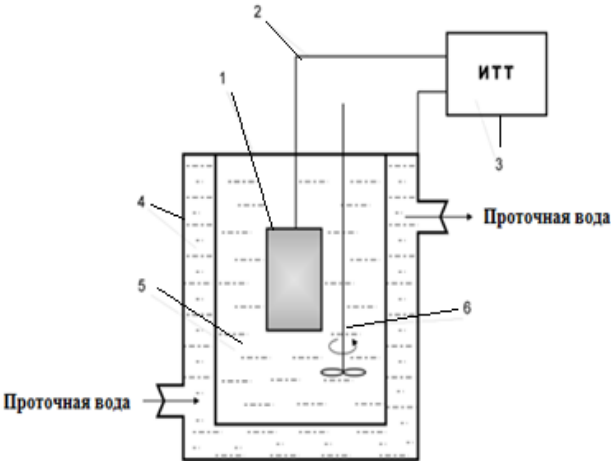


Рисунок 4 - Схема электрохимической ванны для реализации процесса микродугового оксидирования

Электролит	Время обработки τ , мин	Режимы обработки			
		Плотность тока j , А/дм ²	Напряжение U , В	Температура электролита t , °С	Род тока
Раствор 1	6-15	15-20	380-420	18-40	переменный
Раствор 2	4-10	25-30	300-320	18-20	постоянный

Параметры установки УМДО-50А



Рисунок 5 – Установка
микродугового оксидирования
УМДО-50А

Технические характеристики установки	
Питание установки от трехфазной сети переменного напряжения, U_{Π} (линейное напряжение)	380 В
Максимальный средний ток анода при линейном характере сопротивления нагрузки и напряжении на нагрузке до 270 В	$I_{Amax}=50\text{ А}$
Дискретность установки тока анодирования	$dI_{Amax}=0,01 \cdot I_{Amax}$
Максимальное амплитудное значение напряжения на аноде U , А в режиме постоянного тока	до 530 В
Питание цепи анодирования в режиме: • переменного тока переменным напряжением частотой 50 Гц • постоянного тока выпрямленным напряжением частотой 100 Гц	380 В 380 В

Определение толщины покрытия с помощью микроструктурного анализа на металлографическом микроскопе Альтами МЕТ 6

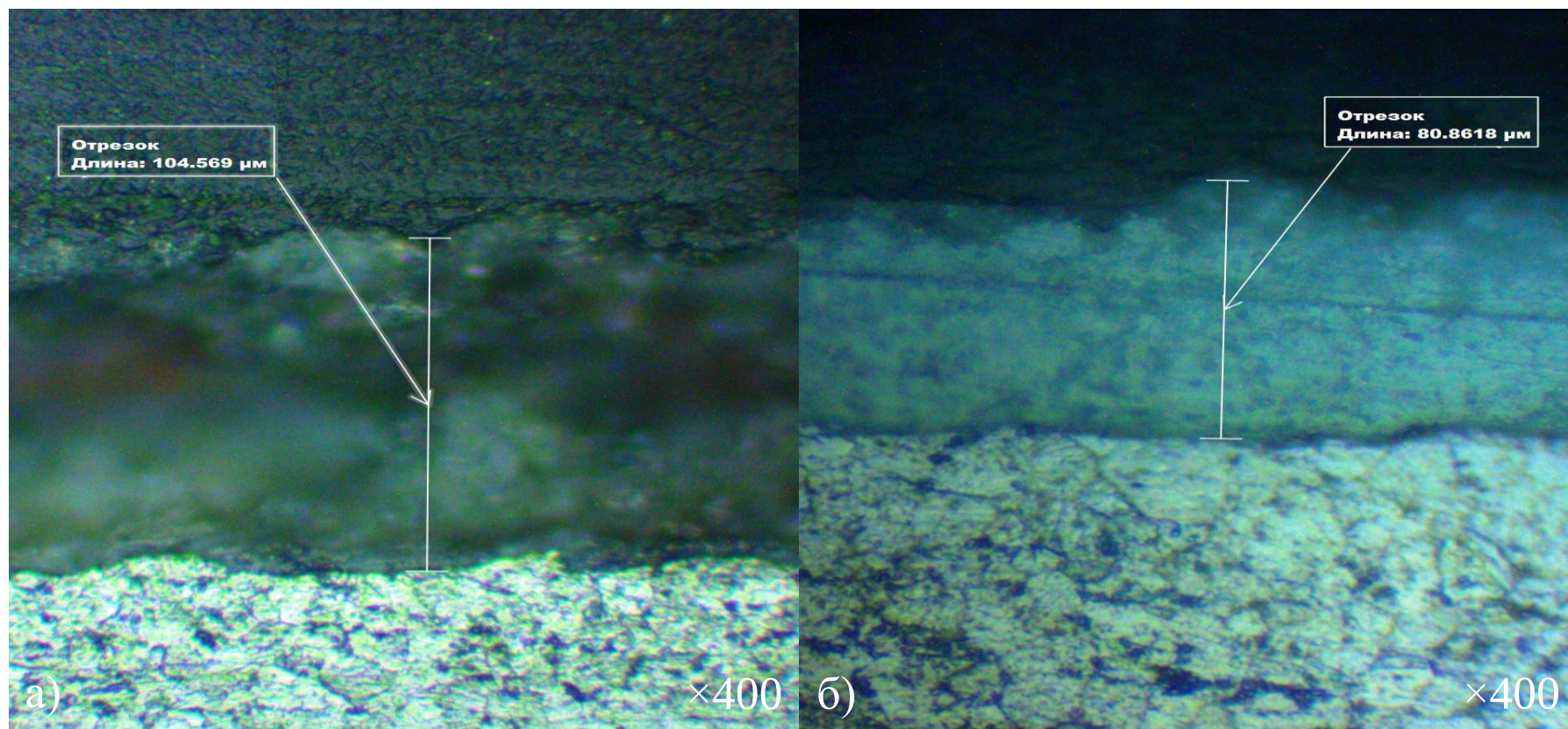


Рисунок 6— Микрошлифы образцов композиционных материалов на основе 5083Н111, полученных на рациональных режимах: а) в силикатно-щелочном электролите, б) в алюминатном электролите



Лаборатория Национального
исследовательского Мордовского
государственного университета им. Н.П.
Огарёва.
Установка *LFA427/7/G* для исследования
теплопроводности методом лазерной
вспышки

Технические характеристики установки

Температурный диапазон	комн. ... 2000°C
Диапазон измерений температуропроводности	0.0001 ... 10 см ² /с
Стандартные размеры образца • в виде диска: • квадратные:	толщина 0.1 ... 6 мм, диаметр 6.0 ... 12.7 мм 10.0 x 10.0 мм
Держатель образца: Al ₂ O ₃ (макс. 1700°C), графит (макс. 2000°C)	
Печь: максимальная температура 2000°C, нагревательный элемент из графита с водяным охлаждением	
Атмосферы испытания: вакуум 10 ⁻⁵ мбар (турбомолекулярный насос), статический/динамический режим – газы (Ar, Ne и др.), окисляющие атмосферы	

Результаты исследований толщины и пористости покрытий

Характеристика покрытия	Раствор 1 (силикатно-щелочной)				Раствор 2 (алюминатный)			
	Режимы обработки							
	$j=20 \text{ А/дм}^2, t=20...25 \text{ }^\circ\text{C}$				$j=30 \text{ А/дм}^2, t=18...20 \text{ }^\circ\text{C}$			
	Продолжительность обработки τ , мин							
	6	9	12	15	4	6	8	10
Толщина δ , мкм	40...55	75...80	85...90	115...130	25...27	37...44	62...66	80..85
Пористость, %	4...6	7...10	10...12	15...20	4...5	7...10	11...14	15...19

Результаты исследований теплофизических характеристик

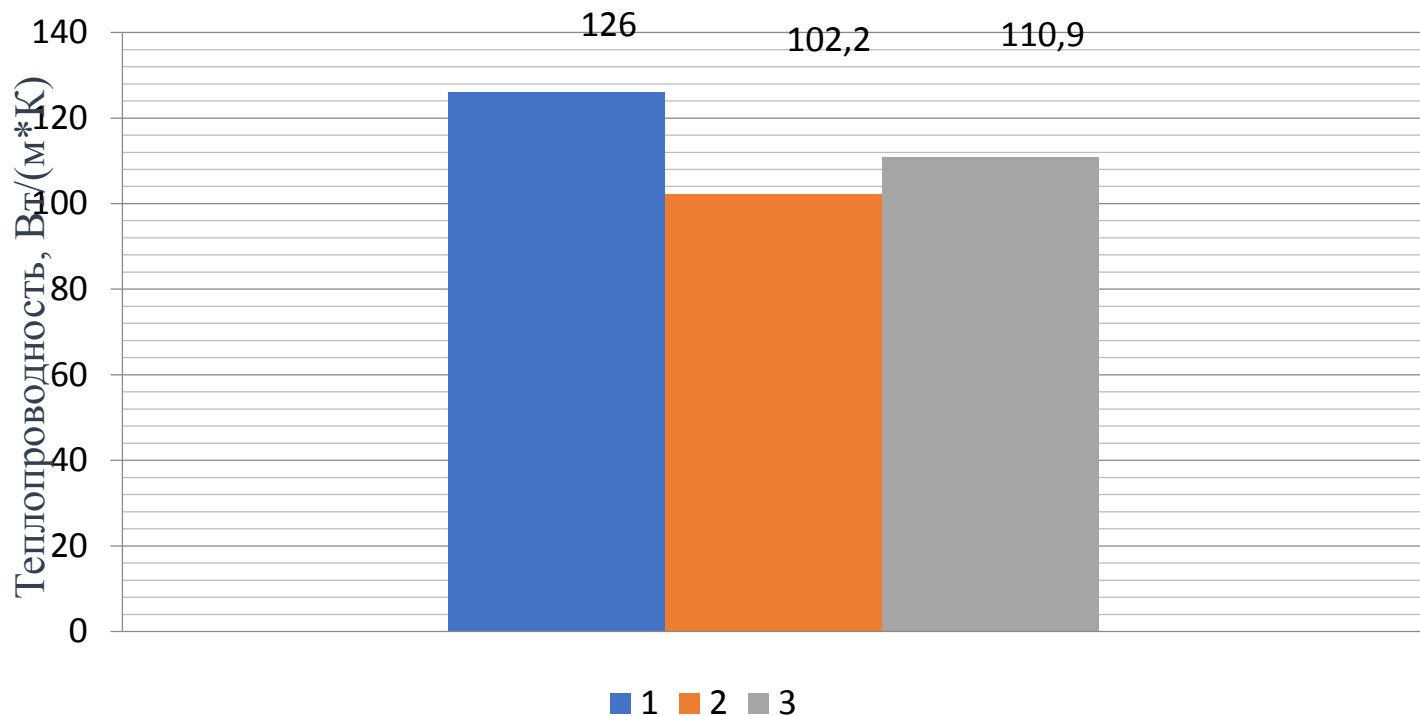


Рисунок 7 – Зависимости средних значений коэффициента теплопроводности композиционных материалов от состава электролита (основа 5083H111).

1 - материал 5083H111; 2 - 5083H111+МДО (раствор 1);
3 - 5083H111+МДО (раствор 2).

Заключение

Проведено исследование теплофизических свойств композиционного материала на основе алюминиевого сплава 5083Н111.

Показана высокая эффективность использования технологии микродугового оксидирования для создания теплозащитных оксидокерамических покрытий при изготовлении изделий на основе алюминия и алюминиевых сплавов для расширения диапазона их функциональных свойств.

Спасибо за внимание