МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Пензенский государственный университет»

Факультет	Кафедра
Промышленных технологий, электроэнергетики и транспорта	Сварочное, литейное производство и материаловедение
Направление подготовки	22.03.01 «Материаловедение и технология материалов»
Профиль	«Материаловедение и технология новых материалов»

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему: «**Исследование свойств оксидно-керамического покрытия, полученного по технологии микродугового оксидирования в хромовокислом электролите»**

Студент _____ (подпись, дата) Аюбов Анзоржон Авазжонович (ФИО полностью)

Научный руководитель *к.т.н., доцент* _____ (подпись, дата) Логинов О.Н. (Фамилия, инициалы)

Нормоконтролёр *к.т.н., доцент* _____ (подпись, дата) Хорин А.В. (Фамилия, инициалы)

Работа допущена к защите (протокол заседания кафедры № __ от _____)

Заведующий кафедрой _____ (подпись) Розен А.Е. (фамилия, инициалы)

Работа защищена с отметкой _____ (протокол заседания ГЭК от_____№_____)

Секретарь ГЭК _____ (подпись) 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» декабря 2024г.

ЗАДАНИЕ
на бакалаврскую работу

Студента гр. 21МТ1 Факультет промышленных технологий, электроэнергетики и транспортаПолитехнического института ПГУ, очной формы обучения по направлению подготовки 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов»

Аюбова Анзоржона Авазжоновича.

Научный руководитель работы: *к.т.н., доцент Логинов О.Н.*
Время выполнения бакалаврской работы: *с 03.02.25 г. по 03.07.2025 г.*
Место преддипломной практики: *кафедра «Сварочное, литейное производство и материаловедение» ПГУ*
Тема работы: Исследование свойств оксидно-керамического покрытия, полученного по технологии микродугового оксидирования в хромовокислом электролите

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

Техническое задание на работу: получить оксидированные в хромовом электролите образцы, произвести исследование толщины, пористости и коррозионной стойкости оксидного керамического МДО покрытия.
Объём и содержание основной части работы:
Пояснительная записка (перечень вопросов, подлежащих разработке, расчетов, обоснований, описаний):
- введение, обоснование актуальности темы исследования, установления объекта и предмета, постановка цели и задач исследования;
- литературно-патентный обзор с выявлением патентной и научно-технической информации, исследованием технического уровня и тенденций развития технологии микродугового оксидирования;
- рассмотрение теории формирования оксидного слоя в МДО процессе;
- обоснование выбора электролита и режимов оксидирования;
- определение методов исследования;

- подготовка образцов и определение оборудования для исследования;
- проведение исследования по установлению влияния плотности тока оксидирования на толщину и пористость покрытия, коррозионную стойкость;
- заключение – выводы и обоснования по теме работы и полученным результатам.

Презентация бакалаврской работы (перечень и содержание плакатов)

- слайд 1 «Тема выпускной квалификационной работы»	*1л А4*
- слайд 2 «Актуальность исследования»	*1л А4*
- слайд 3 «Цель и задачи исследования»	*1л А4*
- слайд 4 «Обоснование выбора электролита и режимов оксидирования»	*1л А4*
- слайд 5 «Схема установки МДО»	*1л А4*
- слайд 6 «Экспериментальное оксидирование в хромовом электролите»	*1л А4*
- слайд 7 «Режимы и результаты оксидирования в хромовом электролите»	*1л А4*
- слайд 8 «Измерение толщины и пористости МДО покрытия»	*1л А4*
- слайд 9 «Результаты коррозионных испытаний»	*1л А4*
- слайд 10 «Основные выводы по работе»	*1л А4*

Рекомендуемая литература:

1. **Иванов И.И. Электрохимические методы обработки металлов** [Текст]. - М.: Металлургия, 2018 - 256 с.
2. **Петров В.В. Микродуговое оксидирование и его применение** [Текст]. - СПб.: Наука, 2020 - 312 с.
3. **Баранов С.А., Кузнецов В.П. Коррозионная стойкость алюминиевых сплавов и методы ее повышения** [Текст]. - М.: Машиностроение, 2017 - 184 с.

Руководитель бакалаврской работы
к.т.н., доцент _____ ЛогиновО.Н.

Задание к исполнению принялстудент
гр. 21МТ1 _____ Аюбов А.А.
03 февраля 2025 г.

Бакалаврскую 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 _____ Логинов О.Н.
подпись
«03» 02 2025 г.

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН
на выпускную квалификационную работу

Студента гр. 21МТ1Факультета промышленных технологий электроэнергетики и транспорта Политехнического института ПГУ, очной формы обучения по направлению подготовки 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов»

Аюбова Анзоржона Авазжоновича

Тема работы: Исследование свойств оксидно-керамического покрытия, полученного по технологии микродугового сксидирования в хромовокислом электролите

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. Определение методов и оборудования для исследования и подготовка образцов. Оформление соответствующих разделов.	10.04.25	23.04.25	выполнено
6. Проведение исследования и анализ полученных данных. Оформление соответствующих разделов.	24.04.25	23.05.25	выполнено
7. Завершение оформления пояснительной записки, схем и рисунков.	24.05.25	04.06.25	выполнено

8. Предварительная защита бакалаврской работы	04.06.25	05.06.25	выполнено
9. Представление завершенной ВКР нормоконтролеру	06.06.25	10.06.25	выполнено
10. Представление бакалаврской работы руководителю на просмотр и проверку на плагиат.	11.06.25	17.06.25	выполнено
11. Полное завершение всех работ и представление научному руководителю на подпись пояснительной записки (совместно с протоколом проверки на плагиат и отзывом руководителя)	18.06.25	19.06.25	выполнено
12. Защита бакалаврской работы	19.06.25	03.07.25	

Прохождение каждого этапа подготовки ВКР подтверждается подписью руководителя.

Студент учебной группы 21МТ1 _____ Аюбов А.А.

"03" 02 2025 г.

АНТИПЛАГИАТ
ОБНАРУЖЕНИЕ ЗАИМСТВОВАНИЙ

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: Аюбов А.А.
Самоцитирование рассчитано для: Аюбов А.А.
Название работы: Исследование свойств оксидно-керамического покрытия, полученного по технологии микродугового оксидирования в хромовокислом электролите
Тип работы: Выпускная квалификационная работа
Подразделение: кафедра "Сварочное, литейное производство и материаловедение" ПГУ

РЕЗУЛЬТАТЫ

- **ВНИМАНИЕ, ДОКУМЕНТ ПОДОЗРИТЕЛЬНЫЙ:** ОБНАРУЖЕНЫ ПОПЫТКИ МАСКИРОВКИ ЗАИМСТВОВАНИЙ. РЕКОМЕНДУЕТСЯ ПРОВЕРИТЬ ПОЛНЫЙ ОТЧЕТ
- **ОТЧЕТ О ПРОВЕРКЕ КОРРЕКТИРОВАЛСЯ:** НИЖЕ ПРЕДСТАВЛЕНЫ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕРКИ ДО КОРРЕКТИРОВКИ

СОВПАДЕНИЯ	22.56%	СОВПАДЕНИЯ	22.56%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	76.01%	ОРИГИНАЛЬНОСТЬ	76.01%
ЦИТИРОВАНИЯ	1.43%	ЦИТИРОВАНИЯ	1.43%
САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%	САМОЦИТИРОВАНИЯ	0%

ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 10.06.2025

ДАТА И ВРЕМЯ КОРРЕКТИРОВКИ: 11.06.2025 10:01

Структура документа: Проверенные разделы: основная часть с.1, 18-33, содержание с.2, введение с.3-17, выводы с.34

Модули поиска: Патенты СССР, РФ, СНГ; IEEE; Интернет Плюс; Переводные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Переводные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; Перефразирования по коллекции IEEE; Публикации eLIBRARY (переводы и перефразирования); Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Шаблонные фразы; Коллекция НБУ; СМИ России и СНГ; Диссертации НББ; Кольцо вузов (переводы и перефразирования); Медицина; Переводные заимствования; Цитирование; Сводная коллекция ЭБС; ИПС Адилет; СПС ГАРАНТ: аналитика; СПС ГАРАНТ: нормативно-правовая документация; Переводные заимствования IEEE; Публикации eLIBRARY; Перефразирования по...

Работу проверил: Логинов Олег Николаевич
ФИО проверяющего

Дата подписи: 11.06.2025

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.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГООБРАЗОВАНИЯ РФ
ФГБОУ ВО «ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
Кафедра «Сварочное, литейное производство и материаловедение»

ОТЗЫВ

РУКОВОДИТЕЛЯ О ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ БАКАЛАВРА

Студент: Аюбов Анзоржон Авазжонович.

Тема Исследование свойств оксидно-керамического покрытия, полученного по технологии микродугового оксидирования в хромовокислом электролите.

Направление подготовки – 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов».

Профиль подготовки – «Материаловедение и технологии новых материалов».

Бакалаврская работасодержит 50 страниц, 10 рисунков, 2 таблицы, 14 использованных литературных источников, 1 приложение.

Целью работы является исследованиесвойств оксидно-керамического покрытия, полученного по технологии микродугового оксидирования в электролите с добавлением соли хромовой кислоты.

Объектом исследования является технология получения оксидно-керамических покрытий методом микродугового оксидирования алюминиевых сплавов.

Предмет исследования – образцы оксидно-керамического покрытия, полученные в электролите с добавлением хромовокислого натрия.

Выпускная квалификационная работа бакалавра посвящена исследованию процесса формирования оксидного покрытия по технологии микродуговой обработкой в электролитах с добавлением хромата натрия и установлениювлияния химического состава электролита и основных режимов оксидирования на скорость формирования толщины и пористости покрытий, итоговой микротвердости и коррозионной стойкости покрытий.

В ходе выполнения бакалаврской работы были решены задачи по: литературному обзору технологии микродугового оксидирования; проведен анализ влияния состава электролита и режимов МДО на толщину и пористость покрытия;определены методы исследования и необходимое оборудование. Проведены экспериментальные исследования по установлению влияния состава

опытного электролита с добавлением хромата натрия и режимов оксидирования на толщину и пористость покрытий. Проведен измерительный контроль микротвердости полученных покрытий.

Аюбов А.А.относится к числу студентов способных самостоятельно проводить некоторый объем теоретических исследований и экспериментальных работ. Владеет методиками исследования материалов.

За время выполнения бакалаврской работы Аюбов А.А.показал себя достаточно грамотным специалистом, обладающим знаниями о методах решения профессиональных материаловедческих задач.

В целом, бакалаврская работа соответствует заданию и требованиям стандарта СТО ПГУ 3.12 - 2018, предъявляемым к выпускным квалификационным работам.

Считаю, что бакалаврская работазаслуживает положительной оценки ГАК, а ее автор Аюбов Анзоржон Авазжонович присвоения квалификации бакалавра по направлению подготовки 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов» и профилю подготовки «Материаловедение и технологии новых материалов».

Отзыв составил доцент кафедры «СЛПиМ»

ФГБОУ ВО «ПГУ» к.т.н., доцент Логинов О.Н.

Аннотация

Пояснительная записка содержит 50 с., 10 рис., 2 табл., 14 источников используемой литературы, 1 прил.

МИКРОДУГОВОЕ ОКСИДИРОВАНИЕ, ОКСИДО-КЕРАМИЧЕСКОЕ ПОКРЫТИЕ, ЭЛЕКТРОЛИТ, ТОЛЩИНА ПОКРЫТИЯ, ПОРИСТОСТЬ ПОКРЫТИЯ, МИКРОТВЕРДОСТЬ, КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ

Тема выпускной квалификационной работы – «Исследование свойств оксидно-керамического покрытия, полученного по технологии микродугового оксидирования в хромовокислом электролите».

Целью работы является исследованиесвойств оксидно-керамического покрытия, полученного по технологии микродугового оксидирования в электролите с добавлением соли хромовой кислоты.

Объект исследования – технология получения корундово керамических покрытий методом микродугового оксидирования.

Предмет исследования – образцы оксидно-керамического покрытия, полученные в электролите с добавлением хромовокислого натрия.

Настоящая выпускная квалификационная работа бакалавра посвящена исследованию процесса формирования оксидного покрытия по технологии микродуговой обработкой в электролитах с добавлением хромата натрия и установлениювлияния химического состава электролита и основных режимов оксидирования на скорость формирования толщины и пористости покрытий, итоговой микротвердости и коррозионной стойкости покрытий.

Содержание

Введение 11
1 Анализ состояния технологии микродугового оксидирования 15
1.1 История возникновение и развитие технологии МДО 15
1.2 Общие сведения о технологии МДО 20
1.3 Оборудование для микродугового оксидирования 22
1.4 Морфология оксидного покрытия, полученного методом 26
микродугового оксидирования алюминия 26
2. Экспериментальная часть 28
2.1 Этапы процесса микродугового оксидирования 28
2.2 Обоснование выбора электролита 31
2.3 Эксперимент по микродуговому оксидированию в выбранном 35
электролите 35
2.4 Выбор методов исследования оксидно-керамического МДО- 36
покрытия 36
2.4.1 Метод определения толщины 37
2.4.2Методы определения пористости 39
2.4.3 Метод определения сквозной пористости 40
2.4.4 Метод определения коррозионной стойкости оксидного МДО-
..... 41
покрытия 41
2.4.5 Метод определения микротвердости 42
2.5 Результаты проведенных исследований свойств оксидно- 43
керамических МДО-покрытий 43
Заключение 46
Список используемых источников 46

Введение

Технология микродугового оксидирования (МДО) представляет собой один из наиболее перспективных методов обработки поверхности металлов и сплавов, позволяющий получать оксидно-керамические покрытия с уникальными свойствами прямо на поверхности изделия.Микродуговое оксидирование (МДО) — это современный метод электрохимической обработки поверхности алюминия и его сплавов, основываясь на принципах анодного оксидирования, эта технология позволяет создавать на поверхности алюминиевых деталей не только прочные и устойчивые к коррозии оксидные покрытия, но и покрытия с поистине уникальными эксплуатационными свойствами. Именно использование режимов оксидирования с микроплазменными разрядами, отличающие МДО от обычного анодирования, способствуют более быстрому формированию более толстых и плотных оксидных покрытий с превосходными механическими и физикохимическими свойствами, сочетая высокую износостойкость, коррозионную защиту, электроизоляционные характеристики и декоративные качества, что делает её востребованной в авиакосмической, машиностроительной, электротехнической и других отраслях промышленности.

Одним из ключевых преимуществ технологии микродугового оксидирования (МДО) является ее высокая производительность в сочетании с экологичностью процесса по сравнению с традиционными методами хромированием или анодированием делает этот метод особенно привлекательным для промышленного применения.

История возникновения МДО уходит корнями в середину XX века, когда ученые начали активно исследовать возможности электрохимических процессов для улучшения эксплуатационных характеристик материалов.

С момента своего появления технология МДО претерпела значительные изменения и усовершенствования. В процессе ее развития исследовались различные параметры, такие как состав электролита, плотность тока, величина напряжения и температура, что позволило достичь максимальной эффективности формирования оксидных слоев. В отличие от традиционного анодного оксидирования, где образуются более тонкие оксидные пленки, МДО обеспечивает получение толстых и пористых оксидных покрытий с высокой прочностью и износостойкостью.

За время развития технологии МДО появились научные представления о составе формируемого покрытия и влияния на него химического состава электролита и режимов оксидирования.

В этой связи актуальной является, цель выпускной квалификационной работы бакалавра: исследование свойств оксидно-керамического покрытия, полученного по технологии микродугового оксидирования в электролите с добавлением соли хромовой кислоты.

В качестве гипотезы выступило предположение, что введение хромата натрия как сильного химически активного окислителя должно способствовать более быстрому переходу процесса окисления к режимам МДО и способствовать формированию более плотного оксидного покрытия с малой пористостью.

Достижение указанной цели и проверка гипотезы осуществлялось путем решения следующих основных задач:

–изучить физико-химические основы технологии микродугового оксидирования;

– рассмотреть особенности метода микродугового оксидирования;

–проанализировать материалы, оборудование и параметры процесса МДО;

–произвести выбор технологических параметров МДО в хромовом электролите;

–получить образцы оксидного МДО покрытия на рациональных режимах;

–выбрать методы исследования свойств покрытий; –

провести исследование полученных образцов.

1 Анализ состояния технологии микродугового оксидирования

1.1 История возникновение и развитие технологии МДО

Технология – это совокупность методов, процессов и инструментов, используемых для выполнения определенных задач. История развития технологии уходит корнями в глубокую древность, когда человек начал применять простые инструменты для улучшения своей жизни.

С течением времени технология развивалась, и люди научились создавать более сложные инструменты и системы, которые помогли им в решении различных проблем и задач. Открытие огня, изобретение колеса, изготовление керамики и металлургия – все это были важные этапы в истории развития технологии.

Одной из важных технологий в современном мире является технология микродугового оксидирования. Эта технология используется для создания защитных покрытий на металлических изделиях, что улучшает их прочность, износостойкость и внешний вид.

Микродуговое оксидирование (МДО) — это технология, используемая для создания прочных оксидных покрытий на алюминиевых сплавах и других металлах. Эта технология возникла в середине XX века и с тех пор развивалась, находя применение в различных отраслях, включая авиацию, автомобилестроение и производство электроники.

Анодирование было открыто в 1920-х годах, но только после войны этот процесс приобрёл промышленную значимость. Первым был внедрён процесс обработки хромовой кислотой Бенгофа-Стюарта, разработанный в 1923-ем году для защиты самолётов, сделанных с применением дюралюминия. Этот процесс всё ещё употребляется в Англии, включая и непростой цикл измерения напряжения, неукоснительно исполняемый согласно спецификациям по безопасности, хотя с технической точки зрения

не существует препятствий для поднятия напряжения до наибольшего значения за малое время. В Америке данный способ в некой степени был заменен на ускоренный процесс, при котором употреблялся более концентрированный раствор, и который осуществлялся при неизменном напряжении, что прекрасно подходит при использовании автоматических установок. Предстоящим совершенствованием этого процесса в Америке занимался Баттель, который поменял от 5 до 10% раствор хромовой кислоты серной кислотой.

Более обширное внедрение получили технологические процессы, основанные на использовании серной кислоты. В первый раз схожий процесс был запатентован Говером и О'Брайном в 1927-ом году в Англии, хотя промышленное развитие они в первый раз получили в США. В других разработках использовалась так же щавелевая кислота, более обширное распространение этот метод получил в Германии. Намного позднее промышленную значимость приобретает анодирование с применением фосфорной кислоты, а именно как кандидатура анодированию хромовой кислотой в аэрокосмической индустрии и в качестве подготовительной обработки для органических покрытий[3].

Первые эксперименты с микродуговым оксидированием начались в 1950-х годах, когда ученые начали изучать способы улучшения свойств алюминиевых сплавов. В этот период активно развивались технологии анодирования, которые использовались для защиты алюминия от коррозии и улучшения его декоративных качеств.

В течение 1960-х и 1970-х годов проводились исследования, направленные на понимание процессов, происходящих при анодировании. Ученые начали осознавать, что при определенных условиях (высокое напряжение и специфические электролиты) можно получить более толстые и прочные оксидные слои.

В 1970-е годы МДО начало применяться в промышленных масштабах. Технология была усовершенствована, и были разработаны методы, позволяющие контролировать параметры процесса, такие как напряжение, температура и состав электролита.

С увеличением требований к качеству и долговечности материалов, микродуговое оксидированиев 1980-е и 1990-е стало популярным в различных отраслях. Оно использовалось для улучшения износостойкости, коррозионной стойкости и адгезии покрытий.

В XXI веке технологии МДО продолжают развиваться. Исследования сосредоточены на улучшении свойств покрытий, таких как стойкость к высоким температурам и окислению, а также на внедрении экологически чистых электролитов.

2000-е годы стали эпохой значительных изменений и усовершенствований в области технологий, связанных с нанесением покрытий. В этот период наблюдалось активное развитие процессов и оборудования, что значительно повысило эффективность и качество получаемых покрытий. Инновационные методы, такие как наноструктурирование, лазерное нанесение и плазменные технологии, начали активно внедряться в производство, что позволило добиться более тонкого и равномерного распределения материалов на поверхности.

Параллельно с этим, на рынок вышли новые добавки и модификаторы, которые значительно улучшили физические и химические характеристики покрытий. Например, появились специальные полимеры и композиты, которые обеспечили повышенную стойкость к коррозии, механическим повреждениям и воздействию агрессивных химических сред. Эти усовершенствования сделали возможным использование покрытий в более сложных условиях, что расширило их область применения.

В результате, технологии нанесения покрытий начали находить применение не только в традиционных отраслях, таких как машиностроение

и строительство, но и в новых сферах, таких как электроника, медицинское оборудование и даже в косметической отрасли. Появление новых технологий также способствовало более устойчивому развитию, так как многие из них были направлены на сокращение использования токсичных материалов и снижение негативного воздействия на окружающую среду.

В целом, 2000-е годы стали временем, когда инновации в области технологий покрытий не только улучшили их качество и функциональность, но и открыли новые горизонты для их применения, тем самым способствуя модернизации и прогрессу в различных отраслях.

2010-е годы стали периодом значительного роста интереса к микродуговому оксидированию (МДО), что можно объяснить рядом факторов, связанных с повышением требований к качеству и долговечности изделий в различных отраслях. В условиях современного рынка, где конкуренция становится все более жесткой, производители стремятся улучшить характеристики своих продуктов, чтобы удовлетворить растущие запросы потребителей и соответствовать строгим стандартам.

Микродуговое оксидирование, как метод, позволяет значительно повысить коррозионную стойкость, твердость и износостойкость металлических поверхностей, что делает его особенно актуальным для таких секторов, как автомобилестроение, аэрокосмическая промышленность, энергетика и медицинская техника. Этот процесс способствует образованию прочного и однородного оксидного слоя, который защищает изделия от неблагоприятных внешних условий, продлевая их срок службы и уменьшая необходимость в частом ремонте или замене[2].

В ответ на растущие требования рынка, в 2010-е годы активно развивались и новые технологии обработки, включая комбинированные методы, которые интегрируют МДО с другими процессами, такими как лазерная обработка, термическое напыление и механическая обработка. Эти инновационные подходы позволяют достигать синергетического эффекта,

улучшая как эксплуатационные характеристики, так и производственные процессы, что в свою очередь приводит к снижению затрат и улучшению качества конечной продукции.

Таким образом, устойчивый рост интереса к микродуговому оксидированию в 2010-х годах стал не только следствием технологических усовершенствований, но и отражением более широких тенденций в промышленности, направленных на повышение качества, надежности и эффективности продуктов. В будущем можно ожидать дальнейшего развития этих технологий, что откроет новые возможности для применения МДО в самых различных сферах.

2020-е годы – это период, когда наблюдается непрерывное совершенствование технологий и значительное увеличение их применения в самых различных отраслях, включая энергетику, биомедицину, сельское хозяйство и производство. В энергетическом секторе активно внедряются возобновляемые источники энергии, такие как солнечные и ветряные установки, что способствует переходу к устойчивым и экологически чистым технологиям. Одновременно с этим, в биомедицине наблюдается бурное развитие телемедицины, генетических исследований и персонализированной медицины, что открывает новые горизонты для диагностики и лечения заболеваний.

Важным направлением исследований остаются наноматериалы, которые обладают уникальными свойствами и могут быть использованы в самых различных областях. Например, в медицине наночастицы используются для целевой доставки лекарств, что значительно повышает эффективность терапии и снижает побочные эффекты. В энергетике наноматериалы могут применяться для создания более эффективных солнечных батарей и аккумуляторов, что способствует улучшению хранения и преобразования энергии.

Также стоит отметить активные исследования в области новых полимерных добавок, которые способны значительно улучшить свойства покрытий, используемых в различных отраслях. Такие добавки могут повысить устойчивость материалов к воздействию химических веществ, ультрафиолетового излучения и механическим повреждениям. Это особенно важно для автомобильной, строительной и упаковочной промышленности, где долговечность и надежность покрытий играют ключевую роль.

В целом, 2020-е годы характеризуются стремительным развитием научных исследований и технологий, что открывает новые возможности для улучшения качества жизни и устойчивого развития общества.

Микродуговое оксидирование стало важным инструментом для повышения эксплуатационных характеристик изделий, что делает его незаменимым в современных производственных процессах.

1.2 Общие сведения о технологии МДО

Микродуговое оксидирование — это процесс формирования оксидной пленки на металлической поверхности путем воздействия электрического разряда между рабочим электродом и поверхностью детали. Он основан на использовании мощного импульсного искрового разряда между электродами, что приводит к образованию оксидных соединений металла с кислородом из воздуха или других реагентов.

В основе микродугового оксидирования лежит использование плазмы, сгенерированной микродуговым разрядом, для активации химических реакций на поверхности материала. В результате происходит окисление материала и образование оксидных соединений. Эти соединения обладают повышенной прочностью и стабильностью, что делает их идеальными для различных приложений.

Процесс образования электрических микроразрядов имеет несколько отличительных особенностей:

а) В электролит погружены оба электрода,на локальных микроучастках между поверхностью материала подложки и электролитным катодом в тонком приэлектродном слое образуются плазменные разрядные каналы проводимости, остальная поверхность при этом контактирует с водным раствором электролита.

б) Происходит образование электролитной плазмы при МДО.

в) При МДО разряд не является тлеющим, искровым, высокочастотным, или дуговым, а имеет сложный характер.

г) Чаще всего МДО проводится в щелочных или кислотных электролитах, улучшающих электропроводность растворов, на переменном токе и при высоких напряжениях до 1000 В.

Преимуществами технологии микродугового оксидирования являются:

– увеличение твердости поверхности металла;

– повышение коррозионной стойкости;

– улучшение диэлектрических свойств;

– получение декоративных эффектов;

– повышение сцепления с покрытиями или клеями;

– повышение адгезии электродных покрытий;

–повышение интегральных характеристик изделий.

–технология микродугового оксидирования.

Наряду с преимуществами технология микродугового оксидирования также имеет и недостатки, среди которых выделяют: сложность и требовательность в выполнении, ограниченные возможности по размерам и формам деталей и возможность получения дефектов в покрытии.

\

1.3 Оборудование для микродугового оксидирования

Для выполнения процесса микродугового оксидирования требуется специальное оборудование, состоящее из нескольких ключевых компонентов, каждый из которых выполняет свою уникальную функцию, обеспечивая эффективность и качество обработки.

Генератор микродугового разряда – это элемент оборудования является сердцем процесса. Он производит высокочастотное импульсное напряжение, необходимое для инициации микродуги. Благодаря своим характеристикам, генератор обеспечивает стабильность и контролируемость разряда, что в свою очередь влияет на качество оксидной пленки и ее свойства. Важно, чтобы генератор имел возможность тонкой настройки параметров работы, таких как частота и амплитуда, чтобы адаптироваться к различным материалам и условиям.

Рабочий электрод – компонент непосредственно контактирует с поверхностью обрабатываемой детали и играет важную роль в образовании микродуги. Он должен быть изготовлен из материалов, способных выдерживать высокие температуры и агрессивные условия, возникающие в процессе. Кроме того, рабочий электрод должен быть конструктивно разработан для обеспечения равномерного распределения электрического поля, что позволяет достичь однородности оксидной пленки.

Электролит – ключевой элемент, который представляет собой специальный состав, содержащий реагенты, необходимые для формирования оксидной пленки на поверхности детали. Выбор электролита существенно влияет на свойства получаемого покрытия, такие как его прочность, коррозионная стойкость и адгезия. Электролит должен обеспечивать оптимальные условия для реакции и эффективно переносить ионы, что критически важно для процесса.

Система управления – элемент включает в себя набор датчиков и регуляторов, которые обеспечивают контроль и регулирование параметров процесса микродугового оксидирования. Система управления может мониторить такие параметры, как напряжение, ток, температура и состав электролита, позволяя оператору в реальном времени адаптировать процесс для достижения наилучшего результата. Современные системы управления могут быть автоматизированными, что значительно увеличивает эффективность и снижает вероятность ошибок.

Каждый из этих компонентов важен для достижения высококачественного результата в процессе микродугового оксидирования, что позволяет получать покрытия с отличными эксплуатационными характеристиками и долговечностью.

Все это оборудование должно быть правильно подобрано и настроено для достижения требуемых характеристик оксидного покрытия и оптимальных результатов обработки металлических поверхностей.

Теория микродугового оксидирования основана на принципе электрохимического процесса. При погружении изделий в раствор электролита и приложении электрического тока, происходит окислительновосстановительная реакция, в результате которой происходит формирование оксидных покрытий на поверхности металла приведено на рисунке 1.

Рисунок 1 – Экспериментальная ванна для микродугового оксидирования

Электролит, содержащий соответствующие добавки и реагенты, позволяет регулировать химический состав и структуру получаемого покрытия. Различные параметры процесса, такие как температура, концентрация электролита, плотность тока и время обработки, также оказывают влияние на свойства покрытия.

Процесс оксидирования проводится в специальных емкостях, в которых создается электрический разряд через погруженные в электролит изделия. Для обеспечения равномерности покрытия, часто используется вращение изделий или механическое перемешивание электролита показано на рисунке 2.

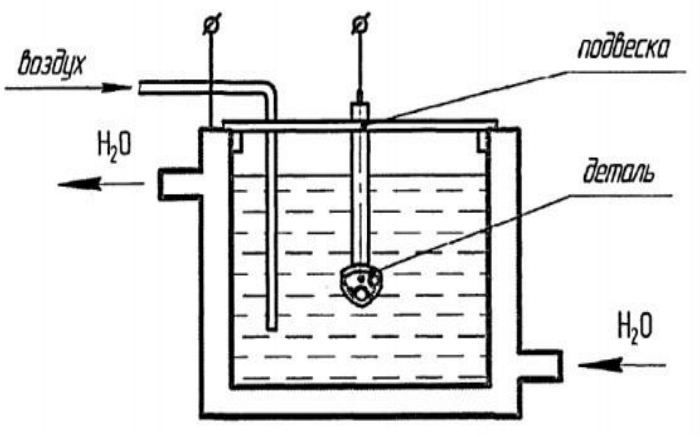

Рисунок 2 – Схема электрохимической ванны для реализации процесса микродугового оксидирования

После оксидирования, покрытие проходит обработку для удаления остаточных электролитов и повышения его стойкости. Это может включать мойку, нейтрализацию, смазывание или дополнительные термические процессы.

Современные технологии микродугового оксидирования продолжают развиваться, и новые методы и процессы постоянно появляются. С появлением новых материалов и улучшением оборудования, эта технология становится еще более эффективной и универсальной.

Будущее технологии микродугового оксидирования связано с продолжением исследований в области новых материалов, разработкой новых методов и улучшением производственных процессов. Это позволит использовать эту технологию в еще большем количестве отраслей и создать более прочные и качественные изделия.

Несмотря на некоторые недостатки, технология микродугового оксидирования является эффективным способом получения прочного и защитного покрытия на металлических поверхностях. Ее использование широко распространено в различных сферах промышленности, где требуется повышенная износостойкость и антикоррозионная защита [5].

Для проведения процесса МДО применяются специальные электролиты, содержащие определенные химические вещества. Эти вещества, такие как нитраты и сульфаты, реагируют с металлом в процессе электролиза, образуя оксидные пленки на поверхности изделия.

Для проведения процесса МДО в промышленности требуется более мощное специализированное оборудование, которое включает в себя те же самые, рассмотренные выше компоненты показаны на рисунке 3.

Рисунок 3 – Промышленная ванна для микродугового оксидирования

1.4 Морфология оксидного покрытия, полученного методом микродугового оксидирования алюминия

Покрытие, формируемое при МДО, имеет сложную многослойную структуру, которая существенно отличается от обычного анодированного

слоя. Его морфология определяется динамикой микродуговых разрядов, плазмохимическими реакциями и условиями кристаллизации оксида.

Общая структура оксидного МДО-покрытияобычно состоит из трёх основных зон (рисунок 4):

а)Внутренний плотный барьерный слой, прилегающий к алюминию как основному металлу (барьерная зона, «*innerdenselayer*»).

Толщина данного слоя составляет порядка от 1 до 10 мкм. Представляет собой плотный, беспористый слой, прилегающий непосредственно к металлу. Образуется за счёт электрохимического окисления без значительного теплового воздействия и преимущественно представлен аморфным оксидом алюминия– корундомα-Al_2O_3 (в начальной стадии),при длительном МДО может частично кристаллизоваться в γ-Al_2O_3.

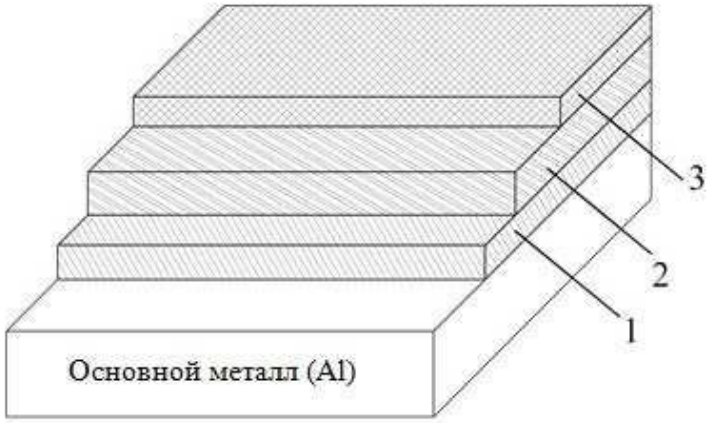

Рисунок 4 – Структура оксидокерамических покрытий на алюминии:

1– тонкийбарьерныйслой (Al, α-Al_2O_3, γ-Al_2O_3);

2 – основнойрабочийслой (Al, α-Al_2O_3, γ-Al_2O_3),

3 – технологическийслой (Al_2SiO_5, α-Al_2O_3, γ-Al_2O_3, Na{ Al_2SiO_5})

б) Промежуточный переходный или рабочий слой (зона спекания, *«intermediatesinteredlayer*»).

Толщина данного слоя, в зависимости от режимов и длительности оксидирования достигает от 5 до 50 мкм. Морфологически менее плотный чем внутренний барьерный слой, ноболее плотный, чем внешний оксидный

слой, содержит микропоры диаметром от 0,1 до 2 мкм. Имеет гранулированную структуру из-за частичного спекания оксида под действием микродуг. Фазовый состав представлен смесью оксидов алюминияα-Al_2O_3 и γ-Al_2O_3. Может содержать включения компонентов электролита, но значительно меньше, чем во внешнем оксидном слое.

в)Внешний пористый слой (пористая зона, «*outerporouslayer*»).

Толщина слоя составляет от 10 до 100 мкм и зависит от режима и длительности МДО. Поверхность внешнего оксидного слоя покрыта кратерами – следами микродуговых разрядов и имеет высокую шероховатость. Состоит из многочисленных пор и каналов диаметром от 1 до 20 мкм, образованных выделяющимися газами (H_2, O_2) и локальным плавлением. Фазовый состав преимущественно представлен оксидом алюминия γ-Al_2O_3 (метастабильная фаза), но в зонах высокотемпературного воздействия может присутствовать корунд α-Al_2O_3, а так же включения элементов электролита (например, Al_2SiO_5, α-Al_2O_3, γ-Al_2O_3, Na{ Al_2SiO_5}).

2. Экспериментальная часть

2.1 Этапы процесса микродугового оксидирования

С технологической точки зрения, процесс микродугового оксидирования включает в себя несколько ключевых подготовительных и основных этапов, каждый из которых играет важную роль в достижении качественного и долговечного оксидного покрытия на металлических изделиях.

Первый этап заключается в подготовке поверхности металла. К ним относятся следующие операции:

1) Приготовление электролита в рабочей ванне с заданными концентрацией и компонентным составом с использованием дистиллированной или деионизированной воды.

2) Корректировка электролита после пробы для химического анализа.

Добавление недостающих компонентов до исходного уровня.

3) Монтаж токоподводов из алюминиевой проволоки диаметром от 4 до 6 мм на детали резьбовым или другим способом для обеспечения механически жесткого и электрически надежного контакта. При необходимости устанавливают дополнительные электроды, уплотнения и изолирующие накладки из фторопласта, капролона, кремнийорганического герметика и др.

4) Подготовка металлического образца.

Этот процесс может включать как механическую, так и химическую очистку. Механическая очистка может осуществляться с использованием абразивных материалов, шлифовальных машин или пескоструйных установок. Химическая очистка, в свою очередь, может включать применение кислотных или щелочных растворов. Или обезжиривание загрязненных деталей в теплой (от 40 до 60 °C) воде с мыльным раствором или моющим средством (например, раствор 40 г/л Na_3PO_4+40 г/л Na_2CO_3 в воде).

5) Промывка деталей под холодной проточной водой (иногда на данном этапе проводится операция электрохимического полирования).

6) Установка деталей с токоподводами в электролитической ванне на подвеске. Обеспечивается полное погружение в электролит, равномерное распределение деталей по объему ванны без лишних соприкосновений, а также дополнительных электродов. Исключается возможность образования воздушных и/или газовых пузырей при установке деталей и в процессе МДО.

В нашем случае, этап подготовки образцов, включает в себя механическую чистку полосы металла, травление выбранного алюминиевого сплава АМг5 в растворе гидроксида натрия, нарезание мерных заготовок и просверливание отверстий для крепления к электроду приведено на рисунок 5.

а) б)

Рисунок 5– Подготовительный этап эксперимента

а – травление образцов в растворе гидроксида натрия; б – нарезание мерных образцов

На втором - основном этапе деталь погружается в электролит, который представляет собой раствор, содержащий различные специальные добавки. Эти добавки могут включать в себя соли, оксиды или другие химические соединения, которые способствуют формированию оксидного покрытия с заданными свойствами, такими как прочность, твердость, коррозионная стойкость и эстетические качества. Выбор электролита, а также его состав, непосредственно влияет на характеристики получаемого покрытия.

Третий этап включает в себя сам процесс микродугового оксидирования. В ходе этого этапа на деталь подаются высоковольтные импульсы, которые создают электрические дуги на поверхности металла. Эти дуги способствуют образованию оксидного слоя, который имеет микропористую структуру, что положительно сказывается на адгезии и механических свойствах покрытия. Важно также в этом этапе проводить регулирование и контроль параметров процесса, таких как время воздействия, сила тока и напряжение. Точное управление этими параметрами позволяет добиться оптимальных характеристик покрытия, что, в свою очередь, обеспечивает высокую эффективность защиты металла от коррозии и механического износа [4].

2.2 Обоснование выбора электролита

Уровень физико-механических, эксплуатационных свойств и качество оксидно-керамических покрытий определяется характеристиками и технологическими возможностями оборудования для МДО (микродугового оксидирования), видом и составом электролита, качеством подготовки поверхности материала изделия перед МДО, режимами МДО (время МДО, род тока, сила тока, напряжение и температура электролита).

В этой связи основной задачей является выбор электролита и подбор оптимальных режимов микродугового оксидирования способствующих увеличению скорости роста оксидного слоя, снижению его пористости, повышению поверхностной микротвердости и коррозионной стойкости изделий, что приведет к расширению области применения оксидированных изделий.

Для решения поставленной задачи был предложен способ микродугового оксидирования в комбинированном электролите на основе жидкого стекла – от 80 до 120 г/л, хромата натрия– от 2 до 10 г/л и гидроксида

натрия– от 2 до 10 г/л.Изменяя реальную концентрацию компонентов электролита в зависимости от плотности тока и напряжения (реально 3 варианта концентрации компонентов в растворе электролита).

Добавление хромата натрия (Na_2CrO_4), в классический силикатнощелочной электролит МДО алюминия существенно меняет химизм процесса, морфологию и свойства покрытия.

В качестве гипотезы выступало предположение, что введение хромата натрия как сильного химически активного окислителя (валентность хрома – VI) должно способствовать более быстрому переходу процесса окисления к режимам МДО и способствовать формированию более плотного оксидного покрытия с малой пористостью.

В целом, каждый компонент составного электролита играет свою роль в формировании оксидно-керамического покрытия:

1. Гидроксид натрия (NaOH) — база электролита, он обеспечивает высокую электропроводность электролита,создает щелочную среду (pH от 11 до 13), необходимую для стабильности силикатов и хроматов.

Именно гидроксид натрия способствует растворению естественного оксида алюминия на первоначальном этапе оксидирования, обеспечивая равномерное инициирование разрядов. За счет высокой ионной проводимости ускоряет рост покрытия и снижает рабочее напряжение процесса МДО по сравнению с кислыми электролитами.

В качестве недостатка гидроксида натрия, следует отметить что он может увеличивать шероховатость поверхности оксидного покрытия из-за более агрессивного химического растворения оксида алюминия, особенно при повышении температуры электролита, а при избыточной концентрации может вызывать высокую пористость и снижение плотности барьерного слоя из-за усиленного растворения оксида, что приведет к снижению коррозионной стойкости и ряда других, важных эксплуатационных свойств полученного покрытия.

2. Силикат натрия– (Na_2SiO_3) – это ключевой модификатор образующегося покрытия. Он источник силикат-ионов (SiO_3^{2-}) и оксида кремния (SiO_2)и участвуя в реакциях плазмохимического синтеза в зоне разряда оказывает значительное влияние на процесс МДО и само покрытие. Именно благодаря наличию силикат-ионов (SiO_3^{2-}) и оксида кремния (SiO_2) в электролите формируются включения SiO_2 или алюмосиликатов в оксидной матрице покрытия, благодаря чему очень быстро увеличивается толщина покрытия (силикаты способствуют как бы «разбуханию» внешнего слоя оксидного покрытия). При этом снижается пористость и повышается плотность внешнего слоя: расплавленный в микродуге силикат«запечатывает» поры при застывании, при этом за счет образования стеклофазыSiO_2, закономерно возрастает твердость и износостойкость покрытия, улучшается термостойкость и адгезия. При этом негативное влияние силикатов проявляется в снижении электрической прочности покрытия (SiO_2 хороший диэлектрик, но может снижать общую стойкость к пробою в толстом слое), а при высокой концентрации силикатов может приводить к образованию хрупких стеклоподобных участков и растрескиванию покрытия.

3. Хромат натрия (Na_2CrO_4) –многофункциональная добавка являющаяся источником хромат-ионов (CrO_4^{2-}) и Cr^{6+}, является сильным окислителем и пассиватором. Согласно нашей гипотезы Cr^{6+} восстанавливается до Cr^{3+} в зоне разряда и на поверхности, образуются оксиды или гидроксиды хрома (Cr_2O_3, CrOOH), интегрированные в образующееся оксидное покрытие, что должно резко повысить коррозионную стойкость покрытия за счет совместной реализации барьерного и катодного механизмов защиты. Наличие хроматов в электролите стабилизирует процесс МДО, подавляя реакции растворения алюминия и образующегося оксида алюминия. Возможно, следует ожидать незначительного превышения твердости покрытия, так как образующийся и

захватываемый оксидным слоем оксид хрома Cr_2O_3– очень твердый оксид. В качестве недостатков следует отметить высокую токсичность шестивалентного хрома Cr^{6+}, что требует строжайших мер безопасности и дорогой утилизации, за счет стабилизации процесса МДО, может замедляться скорость роста покрытия, в ходе МДО ионы Cr^{6+}восстанавливаются до Cr^{3+}, что снижает концентрацию ионов Cr^{6+} в электролите, а соответственно и качество покрытия.

В нашем случае, для решения поставленной задачи был предложен способ микродугового оксидирования в комбинированном электролите на основе жидкого стекла –от 80 до 120 г/л, хромата натрия –от 2 до 10 г/л и гидроксида натрия –от 2 до 10 г/л.

Рисунок 6 – Приготовление экспериментального раствора электролита

Окончательная гипотеза исследования: введение натриевой соли хромовой кислоты как сильного химически активного окислителя должно способствовать более быстрому формированию барьерного оксидного слоя

и переходу процесса окисления к режимам МДО, а так же способствовать формированию более плотного оксидного покрытия с малой пористостью, увеличивая тем самым коррозионную стойкость. Возможно, следует ожидать незначительного превышения твердости покрытия за счет интеграции оксида хрома Cr_2O_3в структуру оксидного слоя. Вместе с тем может наблюдаться замедление скорости роста покрытия.

2.3 Эксперимент по микродуговому оксидированию в выбранном электролите

Способ осуществляется следующим образом: изделие из алюминия или его сплавов помещают в ванну с водным раствором электролита (рисунок 7), компонентами которого является жидкое стекло (от 80 до 120 г/л) хромат натрия (от 2 до10 г/л) гидроксид натрия (от 2 до 10 г/л).

Рисунок 7 – Эксперименты по микродуговому оксидированию в выбранном электролите

Затем подводят постоянный ток плотностью от 5 до 25 А/дм^2 при напряжении от 120 до 500В, на электроды, один из которых (анод) закреплен на обрабатываемом изделии, другой (катод) - на внутренней поверхности

ванны. При взаимодействии, продолжительностью от 10 до 90 минут электрического тока, электролита и материала обрабатываемого изделия происходит окисление его поверхности с образованием оксидных покрытий. Экспериментальные режимы микродугового оксидирования представлены в таблице 1.

После завершения процесса окисления изделие извлекают из ванны, промывают и сушат на воздухе.

Таблица1 – Состав экспериментального электролита и режимы микродугового оксидирования

Группы проб	**Марка материала**	**Параметры процессов**			**Состав электролита, г/л**		
		τ, мин	J, А/дм^2	U, В	$nNa_2O \cdot mSiO_2$	$NaCrO_4$	NaOH
1	АМг5	9	5	115	60	1,8	1,8
2	АМг5	10	8,3	120	80	2	2
3	АМг5	45	16,6	250	80	5	5
4	АМг5	90	25	500	120	10	10
5	АМг5	90	33,3	520	120	10	10

2.4 Выбор методов исследования оксидно-керамического МДО-покрытия

В соответствии с гипотезой исследования для её подтверждения или опровержения необходимо исследовать свойства полученных на разных режимах и концентрациях растворов электролита оксидно-керамических покрытий. Для того, чтобы выбрать оптимальные режимы МДО, нам необходимо оценить общую толщину оксидного слоя и скорость его формирования, пористость формируемого покрытия, а так жемикротвердость.

2.4.1 Метод определения толщины

Для нашего исследования будем применять металлографический метод, который основан на измерении толщины покрытия на металлографическом шлифе поперечного разреза образца (детали) в соответствии с ГОСТ 9.302-88.

Метод применяется для однослойных и многослойных покрытий толщиной более 5 мкм.

Для покрытий толщиной до 20 мкм увеличение должно быть до 1000 крат, толщиной от 20 до 100 мкм до 500 крат, толщиной свыше 100 мкм до200 крат.

Толщину измеряют с помощью металлографических микроскопов. Проводится не менее пяти измерений на отрезке длиной 5 мм в установленном месте шлифа. При подробном изучении шлифа применяют растровый электронный микроскоп.

Относительная погрешность метода составляет ±0,8 мкм для покрытий толщиной до 25 мкм и ±10 % для покрытий толщиной свыше 25 мкм.

Таким образом, толщина полученных оксидно-керамических МДОпокрытий определялась с помощью микроструктурного анализа на металлографическом микроскопе Альтами МЕТ 6 (рисунок 8). Микроструктура шлифов полученного покрытия на основе алюминиевого сплава АМг при различном времени оксидирования представлена на рисунке 9.

Рисунок 8– Металлографическом микроскопе Альтами МЕТ 6

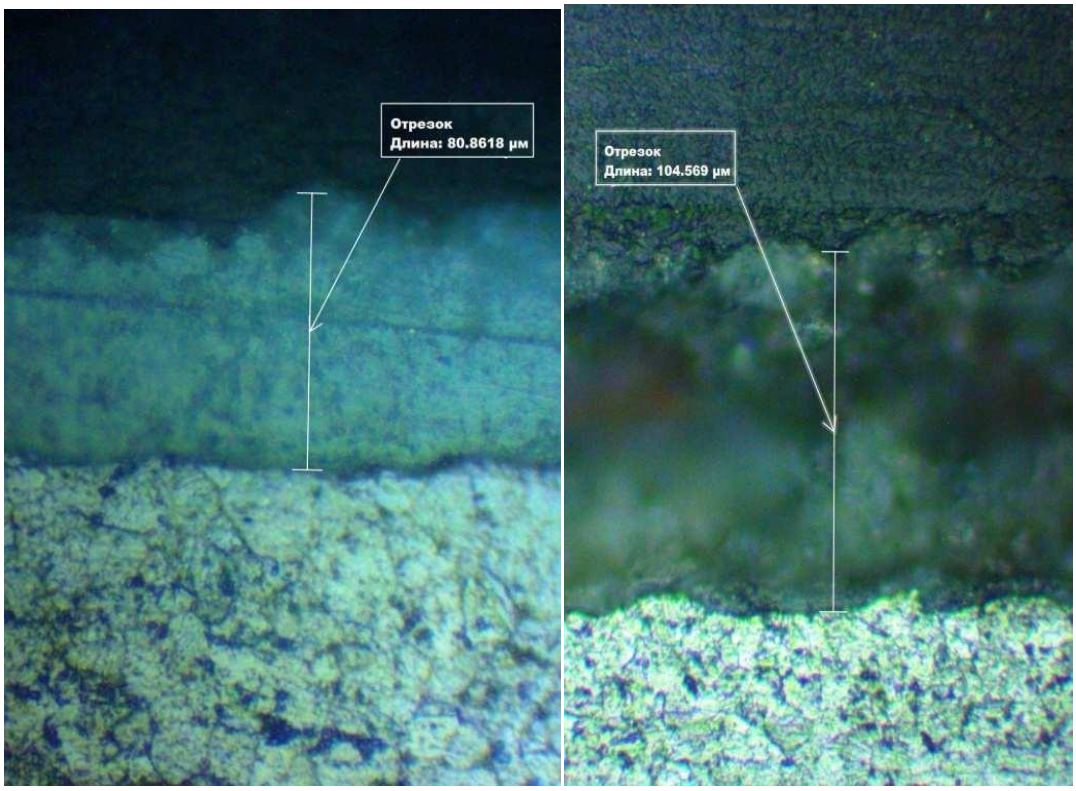

Рисунок 9– Микроструктура шлифов с покрытием различной толщины

Данные снимки микроструктуры показывают, что приведены фотографии, позволяющие визуально проследить за изменением толщины оксидной пленки в зависимости от плотности тока обработки.

2.4.2Методы определения пористости

Наиболее часто, пористость покрытий определяют методом растровой электронной микроскопии, заключающемся в подсчете площади пор на фотографии участка поверхности.

При этом, нужно учитывать, что разрешающая способность растрового электронного микроскопа, применяемого в данном методе от 1 до 100 нм. Образец устанавливается так, чтобы контролируемая поверхность была параллельна плоскости столика микроскопа. Кратность увеличения выбирают в зависимости от измеряемого диаметра пор:

а) при менее 1 мкмувеличение 10000 крат;

б) при более 1 мкм (включительно)увеличение 1000 крат.

Микроскоп настраивается так, чтобы изображенный участок контролируемой поверхности (участок размером 100×100 мкм для пор диаметромот 1 до 10 мкм; участок размером 10×10 мкм для пор диаметром менее 1 мкм) попал в середину поля зрения объектива микроскопа.

Производится фотосъемка контролируемого участка поверхности образца при выбранном увеличении с учетом размера участка. Соотношение масштаба фотографии к размерам контролируемого участка должно быть 1 мм к 1 мкм при увеличении 1000 крат и 1 мм к 0,1 мкм при увеличении 10000 крат. Далее подсчитывается общее число пор на участке, затем с помощью измерительной линейки по ГОСТ 427-75 (предел измерения 300 мм и цена деления 1 мм) измеряют диаметр каждой поры и вычисляют среднюю площадь пор для данного участка фотографии.

Результатом испытаний считается среднеарифметическое значение результатов расчета пористости, полученные на не менее чем девяти фотографиях (по три фотографии разных участков поверхности каждого образца из трех образцов одной выборки).

Пористость покрытий вычисляют по формуле [8]:

$$П = \frac{\bar{s} \cdot n}{S} \cdot 100, \quad (1)$$

где *П*–пористость покрытий, %;

$\bar{s}$ – средняя площадь пор на участке контролируемой поверхности фотографии, мм^2; *n*– число пор на участке контролируемой поверхности, шт.; *S*– площадь участка контролируемой поверхности фотографии, мм^2.

Существует другой способ определения пористости – метод пропитки. Сущность данного метода заключается в погружении композиционных материалов с МДО-покрытиями на 20 мин в авиационное масло, подогретое до 105°С [10].

После извлечения образцов необходимо время для удаления излишков масла. Объем пор оценивается по массе масла, содержавшегося в них по формуле [10]:

$$\beta = ____, \quad (2)$$

где β– отношение объема пористой части пленки к общему объему, %; *S*– площадь поверхности образца, см^2; *m*– масса масла, адсорбированного порами пленки, г; ρ– плотность масла, г/ см^3; *h*– толщина покрытия, мм.

2.4.3 Метод определения сквозной пористости

Всякому испытанию противокоррозионных свойств покрытия должно предшествовать определение пористости (сплошности). Этим часто пренебрегают, а между тем наличие микропор, не видимых не только невооруженным глазом, но и при

небольшом увеличении, является причиной искажения результатов испытания.

Для определения пористости покрытия на металлической пластинке или на каком-либо изделии (железо, цинк, алюминий, медь, латунь) можно пользоваться методом, основанным на выделении более благородных металлов из растворов их солей на поверхности менее благородных металлов. Для этой цели пользуются различными индикаторными растворами. В случае железа можно пользоваться 5%-ным раствором медного купороса, в случае цинка или алюминия — раствором медного купороса, к которому добавляют 0,5% хлористого аммония в случае меди и латуни–5%-ным раствором азотнокислой ртути.

Оксидированные образцы помещают в раствор сульфата меди в котором, при наличии поры доходящей до основного металлического алюминия, не защищенного покрытием, вследствие разности потенциалов происходит химическая реакция восстановления металлической меди, придающей порам красный оттенок. Так как в естественных условиях алюминий всегда защищен пусть и очень тонкой оксидной пленкой, в раствор сульфата меди добавляют 0,5% хлористого аммония.

2.4.4 Метод определения коррозионной стойкости оксидного МДО-покрытия

Коррозионную стойкость оксидного МДО-покрытия определяют с помощью ускоренных лабораторных испытаний. Эти испытания позволяют оценить скорость коррозии и влияние агрессивных сред на покрытие.

Существует несколько методов к определению коррозионной стойкости МДО-покрытий:

– Определение времени коррозионной стойкости покрытия, предполагает выдержку образцов в агрессивной среде в

течении заданного промежутка времени при заданной температуре, вызывающей быстрое коррозионное разрушение. После выдержки образцы промывают, удаляют продукты коррозии и высушивают.

– Весовой метод. Образцы взвешивают до и после выдержки в агрессивной среде, определяют потерю массы.

– Визуальный осмотр. Позволяет выявить характер и определить площадь коррозионного разрушения.

– Определение коррозионных потерь. Для этого потерю массы образцов делят на площадь поверхности, подверженной коррозии.

В нашем случае, для определения времени коррозионной стойкости, испытания проводились капельным методом при нормальных условиях (P = 745 мм рт. ст., t = 20 ^{0}C) В качестве агрессивной среды использовался раствор – 25 мл соляной кислоты; 3 г. бихромата натрия, 75 мл. воды.

2.4.5 Метод определения микротвердости

Микротвердость в HV измеряли по ГОСТ 9450 на микротвердомере ПМТ-3М (приведено на рисунке10) при нагрузке на индентор 1,96 Н. Определение микротвердости осуществляли вдавливанием алмазной пирамиды перпендикулярно в исследуемую поверхность МДО-покрытия.

Рисунок 10 – Микротвердомер ПМТ – 3

Метод стандартизован (ГОСТ 9450—76). В качестве индентора при измерении микротвердости чаще всего, как и в случае определения твердости по Виккерсу, используют правильную четырехгранную алмазную пирамиду с углом при вершине 136°. Эта пирамида плавно вдавливается в образец при нагрузках 0,05—5Н. Число микротвердости *Нм*, МПа, определяется по формуле $Нм = 1{,}854 \cdot 10^5 F/d^2$, где *F*– нагрузка, *H*; *d* – диагональ отпечатка, обычно 7 – 50 мкм;

$d^2/1{,}854$ – площадь боковой поверхности полученного пирамидального отпечатка.

По ГОСТу число микротвердости. МПа, записывают без единицы измерения, например Нм–1050.

2.5 Результаты проведенных исследований свойств оксидно-керамических МДО-покрытий

Как показывают исследования, варьируя продолжительность микродугового оксидирования, плотность и напряжение электрического тока, концентрацию компонентов электролита, можно в широких пределах изменять скорость роста оксидного слоя и его пористость, поверхностную

микротвердость и коррозионную стойкость изделий, что объясняется различной электропроводностью электролита и изменением содержания в покрытии его составляющих - оксида алюминия (Al_2O_3), оксида хрома III (Cr_2O_3); оксихромата алюминия; геля кремниевой кислоты (nSiO2·mH2O); Al_2O_3 SiO_2.

Следует ожидать, что при концентрации хромата и силиката натрия (жидкое стекло) в электролите ниже определенного предела, скорость роста оксидной пленки будет минимальной, а при высоком содержании гидроскида натрия (NaOH) может наблюдаться даже растворение оксидной пленки и полирование образца в результате электро-химического травления щелочью.

Таблица 2– Основные свойства оксидно-керамического МДО-покрытия в электролите с добавлением хромата

Группы проб	**Марка материала**	**Свойства покрытия**				
		Общая толщина, мкм	Vn, мкм/мин	П, %	Микротвердость, МПа	Коррозионная стойкость, час
1	АМг5	40 - 45	4,5 - 5	7	1600	25
2	АМг5	45 - 50	4,5 - 5	7	1600	25
3	АМг5	180 - 200	4,0 - 4,5	9	1850	28
4	АМг5	250	3,0 - 3,5	12	1800	35
5	АМг5	250	3,0 - 3,5	12	1800	30

Полученные результаты исследований свойств оксидно-керамических МДО-покрытий в электролите с добавлением хромата натрия сведены в таблицу 2.

Из анализа полученных данных хорошо видно, что если параметры процесса микродугового оксидирования и концентрация компонентов электролита ниже некоторого предела (образцы 1 группы): τ менее 10 минут, j 5 А/дм^{2}и менее, U менее 120 В, nNa2O· mSiO2 менее 80 г/л, NaCrO4 менее 2 г/л, NaOH менее 2 г/л, то уменьшается скорость роста оксидного слоя,

увеличивается напряжение электрического тока при формировании покрытия, поверхностная микротвердость и коррозионная стойкость изделий недостаточно высоки.

Дальнейшие серии образцов свидетельствуют об увеличении скорости роста оксидного слоя и низкой его пористости, о повышении поверхностной микротвердости и коррозионной стойкости изделий, что позволяет расширить область применения используемых материалов.

Если параметры процесса микродугового оксидирования и концентрация компонентов электролита выше большего предела группа 4 и 5: τ более 90 минут, j более 25 А/дм2, U более 500 В, nNa2O· mSiO2 более 120 г/л, NaCrO4 более 10 г/л, NaOH более 10 г/л, то состав покрытия становится неравномерным, образуются "наросты", состоящие из силиката натрия и геля кремниевой кислоты, оксидный слой растворяется и отслаивается, что приводит к повышению пористости покрытия, уменьшению поверхностной твердости и коррозионной стойкости изделия.

Заключение

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы бакалавра были:

–рассмотрены особенности метода микродугового оксидирования и проанализированы материалы, оборудование и параметры процесса МДО;

– произведено экспериментальное исследование, направленное на выбор технологических параметров МДО в хромовом электролите;

–получены опытные образцы оксидного МДО покрытия на рациональных режимах в хромовом электролите;

– рассмотрены методы исследования свойств покрытий;

– показано, что жидкое стекло в данном электролите позволяет увеличить скорость роста покрытия (Vn), гидроксид натрия увеличивает электропроводность раствора электролита, снижает напряжение электрического тока (U) при формировании оксидного покрытия, повышает твердость покрытия и снижает его пористость, а хромат натрия увеличивает плотность и коррозионную стойкость изделий.

–проведенные исследования полученных образцов показали, что с увеличением времени, напряжения и плотности тока увеличивается скорость роста оксидного слоя (Vn = 4,0 – 4,5 мкм/мин), при низкой его пористости (9 - 12 %), повышается поверхностная микротвердость (1800 - 1850) и коррозионная стойкость покрытий (до 30 часов), что позволяет расширить область применения используемых материалов.

Список используемых источников

1. **Холодов, Ю. А. Микродуговое оксидирование. Наука и человечество** [Текст]: Международный ежегодник/ М.: Знание, 1981, – 342 с.

2. **Суминов, И. В. Микродуговое оксидирование** (обзор) [Текст]: И. В. Суминов, А. В. Эпельфельд, В. Б. Людин, А. М. Борисов, Б. Л. Крит // Приборы. – 2001. – Т. 9. –38 с.

3. **Петросянц, А. А. Кинетика изнашивания покрытий, нанесенных методом микродугового оксидирования** [Текст]: А. А. Петросянц, В. Н. Малышев, В. А. Федоров, Г. А. Марков // Трение и износ. – 1984. – Т. 5, № 2. –352 с.

4. **Коломейченко, А. В. Микродуговое оксидирование как способ повышения ресурса деталей машин при их производстве или восстановлении** [Текст]: А. В. Коломейченко, В. Н. Логачев, Н. В. Титов, И. Н. Кравченко // Техника и оборудование для села. – 2014. – Т. 202, № 4. –35 с.

5. **Суминов, И.В. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов** [Текст]: в 2 т. под общ.ред. И.В. Суминова. – М.: Техносфера, 2011. – Т. 2. – 512 с.

6. **Степанов, В.А. Микродуговое оксидирование поверхности деталей из алюминиевых сплавов** [Текст]: В.А. Степанов, А.Л. Хохлов, К.У. Сафаров // Материалы II-й Открытой Всероссийской научнопрактической конференции молодых ученых. Ч. 2.: Молодежь и наука XXI века – Ульяновск: УГСХА, 2007 – 314 с.

7. **Суминов, И.В. Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование)**[Текст]: учеб. для вузов / И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд, В.Б. Людин, Б.Л. Крит, А.М. Борисов. - М.: ЭКОМЕТ, 2005. - 368 с.

8. **Дударева, Н.Ю. Влияние режимов микродугового оксидирования на свойства формируемой поверхности**[Текст] / Н.Ю. Дударева // Вестник УГАТУ Т.17№3 (56) - Уфа: УГАТУ, 2013 - С. 217-222.

9. **Саакиян, Л.С. Применение поверхностного упрочнения алюминиевых сплавов и покрытий для повышения коррозионномеханической стойкости деталей нефтепромыслового оборудования.** [Текст] / Л.С. Саакиян, А.П. Ефремов, Л.Я.Ропяк, А.В. Эпельфельд - Москва:
ВНИИОЭНГ,
1986. - 60с.

10. **Гуляев, А.П. Металловедение**[Текст]: учеб. для вузов / А.П. Гуляев - М: Металлургия, 1978 - 646 с.

11. **Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы контроля** [Текст]:ГОСТ 9.302-88. - Введ. 1990-01-01. - М.: Издательство стандартов, 1990 - I, 40 с.:ил.

12. **Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия анодно-окисные полуфабрикатов из алюминия и его сплавов. Общие требования и методы контроля**[Текст]: ГОСТ 9.031-74. - Введ. 1975-06-30. - М.: Издательство стандартов, 1974. -II, 14 с.: ил.

13. **Аверьянов, Е.Е. Справочник по анодированию**[Текст] / Е.Е. Аверьянов. - М.: Машиностроение. 1988 - 224 с.

14. **Пономарев, И.С. Особенности процесса микродугового оксидирования алюминиевых сплавов при работе с типовыми промышленными источниками питания** [Электронный ресурс]/ И.С. Пономарев, Е.А.Кривоносова // Современные проблемы науки и образования, № 6 -2014:[сайт]. *URL*: *https://scienceeducation.ru/ru/article/view?id*=16037 (дата обращения: 18.05.2025).

ПРИЛОЖЕНИЕ

Министерство науки и высшего образования РФ
ФГБОУ ВО «Пензенский Государственный Университет»
Кафедра «Сварочное, литейное производство и материаловедение»

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
на тему:

Исследование свойств оксидно-керамического покрытия, полученного по технологии микродугового оксидирования в хромовокислом электролите

Выполнил:
Студент гр.21МТ1
Аюбов А.А.

Руководитель:
к.т.н, доцент
Логинов О.Н.

Пенза, 2025

Актуальность исследования

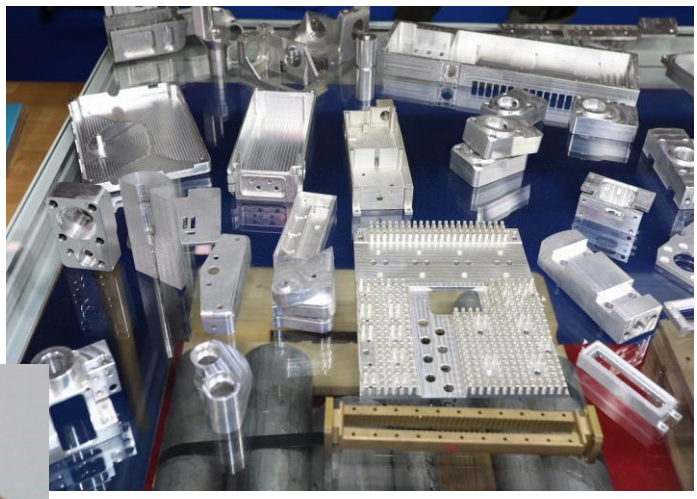

Рисунок 1 – Номенклатура изделий из алюминиевых сплавов

Рисунок 2 – Оксидные МДО покрытия

Цель и задачи исследования 3

Целью является получение оксидно-керамического покрытия по технологии микродугового оксидирования в электролите с добавлением соли хромовой кислоты и исследование его свойств.

Достижение указанной цели осуществлялось путем решения следующих **основных задач**:

• изучить физико-химические основы технологии микродугового оксидирования;
• проанализировать материалы, оборудование и параметры процесса МДО;
• произвести исследование технологических параметров МДО в хромовом электролите;
• получить образцы оксидного МДО покрытия на рациональных режимах;
• выбрать методы исследования свойств покрытий;
• провести исследование полученных образцов.

3

Выбор электролита для МДО 5

Для решения поставленной задачи был предложен способ микродугового оксидирования в комбинированном электролите на основе жидкого стекла - 80... 120 г/л, хромата натрия - 2... 10 г/л и гидроксида натрия - 2... 10 г/л.

Гипотеза исследования: введение натриевой соли хромовой кислоты как сильного химически активного окислителя должно способствовать более быстрому переходу процесса окисления к режимам МДО и способствовать формированию более плотного оксидного покрытия с малой пористостью.

Рисунок 4 – Приготовление раствора электролита для первой серии МДО покрытий

5

Подготовка образцов для МДО

6

Рисунок 5 – Травление сплава АМг5 для МДО покрытий

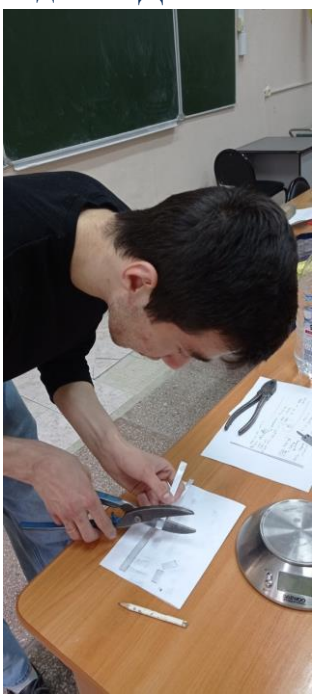

Рисунок 6 – Нарезание мерных заготовок для МДО покрытий

6

Схема установки для получения МДО-покрытий

7

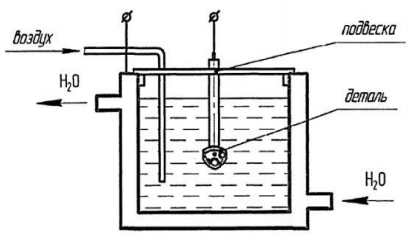

Рисунок 7 - Схема электрохимической ванны для реализации процесса микродугового оксидирования

Рисунок 8 – Пример процесса микродугового оксидирования.

7

Процесс получения МДО-покрытий в хромовом электролите 8

Рисунок 9 – Процесс микродугового оксидирования 8

9

РЕЖИМЫ ОКСИДИРОВАНИЯ

Режимы оксидирования образцов в электролитах

Группы проб	Марка материала	Параметры процессов			Состав электролита, г/л		
		τ, мин	J, А/дм^2	U, В	$nNa_2O \cdot mSiO_2$	$NaCrO_4$	NaOH
1	АМг5	9	4	115	80	1,8	1,8
2	АМг5	10	5	120	80	2	2
3	АМг5	45	12	250	80	5	5
4	АМг5	90	25	500	120	10	10
5	АМг5	92	28	520	120	11	11

Исследования толщины и пористости

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

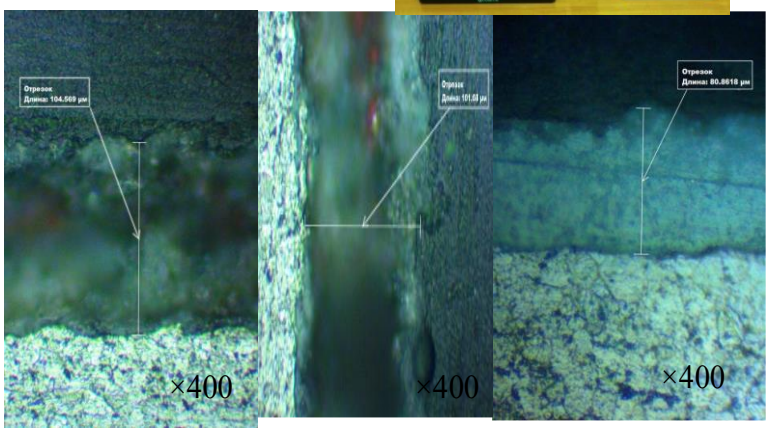

Рисунок 10 – Измерение толщины МДО покрытия

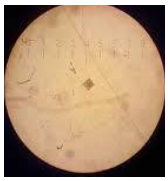

Рисунок 11 – Измерение микротвердости МДО покрытия на ПМТ -3

Основные свойства МДО покрытий в электролите с добавлением хромохромата натрия

Группы проб	Марка материала	Свойства покрытия				
		Общая толщина, мкм	Vn, мкм/мин	П, %	Микротвер-дость, МПа	Коррозионная стойкость, час
1	АМг5	40 - 45	4,5 - 5	7	1600	25
2	АМг5	45 - 50	5,0	7	1600	25
3	АМг5	180 - 200	4,0 - 4,5	9	1850	28
4	АМг5	540 - 600	6,0 - 7,0	12	1850	35
5	АМг5	550 - 600	6,0 - 7,0	12	1850	35

Основные результаты и выводы

12

В ходе выполнения бакалаврской работы

• изучены физико-химические основы технологии микродугового оксидирования;

• рассмотрены особенности метода микродугового оксидирования и • проанализированы материалы, оборудование и параметры процесса МДО;

• произведено экспериментальное исследование направленное на выбор технологических параметров МДО в хромовом электролите;

• получены опытные образцы оксидного МДО покрытия на рациональных режимах в хромовом электролите;

• рассмотрены методы исследования свойств покрытий;

• показано, что жидкое стекло в данном электролите позволяет увеличить скорость роста покрытия (Vn), гидроксид натрия увеличивает электропроводность раствора электролита, снижает напряжение электрического тока (U) при формировании оксидного покрытия, повышает твердость покрытия и снижает его пористость, а хромат натрия увеличивает плотность и коррозионную стойкость изделий.

• проведенные исследования полученных образцов показали, что с увеличением времени, напряжения и плотности тока увеличивается скорость роста оксидного слоя при низкой его пористости, повышается поверхностная микротвердость и коррозионная стойкость покрытий, что позволяет расширить область применения используемых материалов.

13