

На правах рукописи

*Люй Лань*

ЛЮЙ ЛАНЬ

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И ЭВОЛЮЦИИ УСТАЛОСТНОГО  
ПОВРЕЖДЕНИЯ ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ  
МИКРОДУГОВОМ ОКСИДИРОВАНИИ ДЕФОРМИРУЕМЫХ  
АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Специальность 2.6.17. Материаловедение

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» (ФГБОУ ВО «КНАГУ») на кафедре «Материаловедение и технология новых материалов».

**Научный руководитель:** **Башков Олег Викторович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Материаловедение и технология новых материалов» ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», г. Комсомольск-на-Амуре.

**Официальные оппоненты:** **Гордиенко Павел Сергеевич**, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, заведующий лабораторией защитных покрытий и морской коррозии ФГБУН Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Владивосток

**Бурков Александр Анатольевич**, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физико-химических основ технологии материалов ФГБУН Хабаровский Федеральный исследовательский центр Институт Материаловедения Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Хабаровск

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН), г. Томск

Защита диссертации состоится 11 апреля 2025 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.316.01 при Комсомольском-на-Амуре государственном университете (ФГБОУ ВО «КНАГУ») по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27, корп. 3, ауд. 201/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Комсомольского-на-Амуре государственного университета:

[https://sovet.knastu.ru/diss\\_defense/show/199](https://sovet.knastu.ru/diss_defense/show/199)

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные и заверенные печатью организации, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета и по электронной почте [diss.material@yandex.ru](mailto:diss.material@yandex.ru).

Автореферат разослан «\_\_\_» февраля 2025 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета, к.т.н.



Проценко Александр Евгеньевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В настоящее время алюминий и его сплавы высоко востребованы в качестве конструкционных материалов из-за ряда технологических и эксплуатационных свойств, к которым относится низкая плотность, высокая прочность и коррозионная стойкость. Сплавы алюминия широко применяются в качестве конструкционного материала в авиастроении, машиностроении и прочих отраслях промышленности. Растущие требования к конструкционным материалам устанавливают всё более высокие требования к ресурсу и сроку службы изделий и элементов конструкций и актуальной становится проблема модификации поверхности и нанесения защитных покрытий.

В случае алюминиевых сплавов, одним из перспективных способов нанесения защитных покрытий является оксидирование поверхностного слоя с целью получения плотной керамической плёнки с высокими твердостью и прочностью. Традиционно используемым методом оксидирования поверхности является анодирование, однако, данный метод связан с высокими операционными затратами и вредностью производства. Технология микродугового оксидирования (МДО) лишена проблем высоких стоимостных затрат и опасности производства, тем не менее, данная технология отличается большей сложностью контроля процесса в связи с малой изученностью зависимостей влияния параметров процесса МДО и характеристик получаемых защитных покрытий.

Таким образом, актуальной является задача выбора оптимальных параметров метода МДО для обеспечения контроля получения оксидных покрытий. Решение данной задачи заключается в исследовании и установлении закономерностей влияния задаваемых параметров МДО на характеристики получаемого оксидного покрытия. Основными методами исследования и оценки параметров оксидных покрытий являются микроскопические исследования и измерения твердости, а для оценки функциональных характеристик используются методы статических и циклических испытаний. Таким образом, контроль характеристик покрытий осуществляется последующими испытаниями после получения.

Статические испытания, сопровождаемые методами неразрушающего контроля, позволяют извлечь ценную информацию об особенностях поведения материалов в условиях нагрузок, близким к эксплуатационным. Метод акустической эмиссии (АЭ) нашёл широкое применения из-за возможности регистрации микроповреждений материала непосредственно по мере их возникновения.

**Степень разработанности темы:** Большой вклад в развитие теоретических механизмов и совершенней практических технологий МДО, применяемых в различных материалах, внесли такие российские и зарубежные ученые, как Т.Б. Ван, Г.П. Виртц, С.В. Гнеденков, П.С. Гордиенко, А.Л. Ерохин, М.М. Криштал, П. Курце, Ц. Мяо, А. В. Николаев, А.И. Слонова, В. Сюэ, В.А. Федоров, Ю. П. Шаркеев и другие. Большой вклад в развитие теоретических и практических исследований основ анализа АЭ при деформации и разрушении материалов внесли такие российские и зарубежные ученые, как Г.А. Бигус, В.С. Бойко, С.И. Буйло, А. Грин, Ю.Б. Дробот, В.И. Иванов, Д.Л. Мерсон, Г.Б. Муравин, К. Оно, А. Поллок, М. Саус, Л.Н. Степанова и другие. В большинстве научных работ о технологии МДО описаны теоретические аспекты, механизм осаждения оксида, теоретическая модель электрической пробоя. Работы связаны с методом АЭ описаны механизм разрушения материалов и распространения АЭ волн в материалах, обработки АЭ сигналов, зарегистрированных при разрушении, и причины их происхождения.

**Цель диссертационной работы** заключается в установлении закономерностей влияния технологических режимов микродугового оксидирования на характеристики и свойства оксидных покрытий, формируемых на деформируемых алюминиевых сплавах, и оценки влияния режимов МДО на процесс усталостного разрушения для повышения показателей их механических свойств и эксплуатационных характеристик.

Для достижения поставленной цели решались *следующие задачи*:

1. Проведение экспериментальных исследований по формированию оксидных покрытий на деформируемых алюминиевых сплавах 7075, Д16АТ, 1163 и установление особенностей влияния технологических режимов МДО на характеристики, микротвердость и морфологию оксидных покрытий.

2. Проведение усталостных испытаний на циклический изгиб деформируемых алюминиевых сплавов 7075, Д16АТ с оксидными покрытиями, сформированными методом МДО, и установление закономерностей влияния оксидных покрытий на долговечность исследуемых алюминиевых сплавов с установлением причин и механизмов накопления усталостных повреждений.

**Объектом исследования** являются деформируемые алюминиевые сплавы с оксидным покрытием, формируемым методом МДО на поверхности металлов, и алюминиевые сплавы в состоянии поставки без покрытий.

**Предметом исследования** являются эксплуатационные характеристики и механические свойства оксидных покрытий и закономерности изменения свойств и характеристик оксидных покрытий и деформируемых алюминиевых сплавов с покрытиями, сформированными при МДО в условиях изменения периода оксидирования, плотности тока и индуктивности электрической цепи.

**Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:**

1. Определено влияние периода, плотности тока оксидирования и индуктивности электрической цепи на характеристики и механические свойства оксидных покрытий, формируемых на деформируемых алюминиевых сплавах при микродуговом оксидировании в электролите на основе гексаметафосфата, силиката и гидроксида натрия. Установлена закономерность, показывающая монотонный рост толщины и микротвердости оксидных покрытий на алюминиевом сплаве 7075 при увеличении периода оксидирования и индуктивности цепи до 17,6 мГн при фиксированной плотности тока.

2. Установлено увеличение циклической долговечности в широком диапазоне напряжений при изгибе деформируемого алюминиевого сплава 7075 с оксидным покрытием до 20 мкм, формируемым при МДО в электролите на основе гексаметафосфата, силиката и гидроксида натрия, и с оксидным покрытием до 36 мкм при условии нагружения с амплитудой цикла напряжения более 200 МПа.

3. Установлено, что причиной увеличения долговечности деформируемых алюминиевых сплавов с оксидными покрытиями является наличие барьерного оксидного слоя, препятствующего развитию усталостных повреждений в поверхностных слоях пластичной подложки в инкубационный период развития циклической усталости.

**Теоретическая и практическая значимость диссертации заключается в:**

- получении экспериментальных результатов, устанавливающих влияние параметров МДО на технологические характеристики и механические свойства оксидных покрытий, формируемых при МДО на деформируемых алюминиевых сплавах;

- установлении экспериментальных зависимостей, определяющих положительное влияние оксидных покрытий, формируемых при МДО на деформируемых алюминиевых сплавах 7075, Д16АТ и 1163;

- внедрении полученных в работе результатов исследований в учебный процесс при курсовом и дипломном проектировании, чтении курсов в области материаловедения и приняты к использованию при отработке технологии нанесения оксидных покрытий на корпусах изделий из алюминиевых сплавов на предприятии ООО «ЭСКО» с целью повышения эффективности технологического процесса.

**Методология и методы исследования.** В работе использовались современные методы исследования структуры и механических свойств материалов, эволюции структурных

изменений при механическом воздействии на материалы. Экспериментальные исследования проводились на оборудовании центра коллективного пользования научным оборудованием «Новые материалы и технологии», функционирующего на базе ФГБОУ ВО «КНАГУ». МДО выполнялось с использованием программно-аппаратного комплекса, изготовленного в ДВФУ и разработанного при участии Института химии ДВО РАН. Механические испытания на усталость выполнялись на магнитодинамической установке для циклических испытаний на изгиб. Для выполнения исследований поверхности и структуры покрытий использовались оптический микроскоп Nikon MA-200 и сканирующий электронный микроскоп Hitachi S-3400N. Микротвердость измерялась стационарным прибором HNV-2, шероховатость – портативным измерителем TR-200. Регистрация и анализ сигналов АЭ выполнялись с использованием АЭ системы на базе АЦП PCI-9812 и программного обеспечения AE Pro-2.0. Для компьютерной обработки и расчета результатов экспериментальных исследований использовалось программное обеспечение Matlab и MS Excel.

***На защиту выносятся:***

1. Зависимости между режимами оксидирования, технологическими характеристиками и свойствами оксидных покрытий, формируемых в процессе МДО в электролите на основе гексаметафосфата, силиката и гидроксида натрия на поверхности алюминиевых сплавов 7075, Д16АТ.

2. Закономерности влияния оксидных покрытий, формируемых методом МДО на деформируемых алюминиевых сплавах 7075, Д16АТ, на их усталостную долговечность.

3. Методика экспериментальных исследований по установлению закономерности влияния режимов оксидирования на толщину, шероховатость и микротвердость оксидных покрытий, формируемых при МДО на алюминиевых сплавах.

***Достоверность и обоснованность результатов.*** Достоверность и обоснованность результатов обусловлена применением современных методов исследования в материаловедении (оптическая и электронная микроскопия, методы механических испытаний, метод акустической эмиссии и методы анализа экспериментальных данных), наличием поверенного оборудования, корректностью постановки задач и обоснованным выбором материалов исследования, достаточным объемом экспериментальных данных и обоснованностью представленных результатов.

***Апробация работы.*** Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований» (Комсомольск-на-Амуре, 2022, 2023); Международной научно-практической конференции «Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению» (Комсомольск-на-Амуре, 2022, 2023, 2024); Международной научной конференции с элементами научной школы для молодежи «Новые материалы и технологии в условиях Арктики» (Якутск, 2023); Российско-китайском симпозиуме по материалам и технологиям (Хабаровск, 2024), Международной конференции по физической мезомеханике (Томск, 2022, 2023).

***Публикации.*** По результатам исследований опубликовано 16 работ, из них 3 публикации в изданиях, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ, 1 публикации в издании, входящем в зарубежные базы цитирования (Web of Science, Scopus и др.), 1 патент на изобретение.

***Соответствие диссертации паспорту специальности:*** Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования, научной новизне и практической значимости соответствует паспорту специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки) по следующим пунктам:

1. Разработка новых металлических, неметаллических и композиционных материалов, в том числе капиллярно-пористых, с заданным комплексом свойств путем установления фундаментальных закономерностей влияния дисперсности, состава, структуры, технологии, а также эксплуатационных и иных факторов на функциональные свойства материалов. Теоретические и экспериментальные исследования фундаментальных связей состава и структуры металлических, неметаллических материалов и композитов с комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств с целью обеспечения надежности и долговечности деталей, изделий, машин и конструкций (химической, нефтехимической, энергетической, машиностроительной, легкой, текстильной, строительной);

5. Установление закономерностей и критериев оценки разрушения металлических, неметаллических и композиционных материалов и функциональных покрытий от действия механических нагрузок и внешней среды;

11. Разработка функциональных покрытий различного назначения и методов управления их свойствами и качеством.

***Связь работы с крупными научными программами и темами:***

Диссертационная работа выполнена при финансовой поддержке грантов:

1. Грант Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ РФ, НШ № 452.2022.4.

2. Государственный грант министерства науки КНР, Provincial Key Research and Development Program Guidance, проект № G2022011006.

***Личный вклад автора.*** Личный вклад автора заключается в постановке задач исследований, проведении экспериментальных исследований и их анализе, подготовке публикаций и формировании выводов по работе.

***Структура и объем диссертационной работы.*** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 160 наименований, 2 приложений. Работа изложена на 148 страницах машинописного текста (включая приложения), содержит 8 таблиц, 35 рисунков.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность научных исследований, сформулирована цель и определены задачи исследования, показана научная новизна, практическая и теоретическая значимость и апробация полученных результатов.

В **первой главе** обосновывается актуальность предпринимаемых исследований в рамках данной диссертационной работы. Приведен анализ методов формирования оксидных покрытий, а также анализ методов исследования оксидных покрытий и анализ влияния структуры упрочняющих покрытий на механические свойства материалов. На основании анализа современного состояния технологии и методов нанесения оксидных покрытий представлены выводы, на основании которых сформулирована цель работы, основные задачи, необходимость выполнения экспериментальных исследований.

Во **второй главе** приведено описание материалов, выбранных в качестве объекта экспериментальных исследований, разработан план и приведены методики выполнения исследований. При выполнении диссертационной работы использовались как общепринятые методики структурного анализа полученных покрытий, определения механических свойств материалов с покрытиями, так и методики, разработанные на кафедре «Материаловедение и технология новых материалов» в рамках выполнения исследований по теме диссертации.

Для установления зависимости режимов МДО, а также выбранного электролита, на структуру и свойства оксидных покрытий, в том числе на свойства алюминиевых сплавов с покрытиями, были проведены экспериментальные исследования по формированию покрытий на алюминиевом сплаве 7075 и других деформируемых алюминиевых сплавах (Д16АТ,

1163). Для формирования покрытия использовалось оборудование, разработанное в ДВФУ совместно с институтом химии ДВО РАН. При МДО использовался режим импульсного постоянного тока, режимы оксидирования задаются программой, управляющей модулем тиристорного преобразователя. Импульсы формируются из 3-х фазной электрической сети, поэтому их частота при двухполупериодном преобразовании составляет 300 Гц. Оксидирование осуществлялось в небольшом резервуаре из нержавеющей стали, при использовании системы охлаждения температура электролита не превышала 30 °С.

С целью установления закономерностей формирования оксидных покрытий на деформируемых алюминиевых сплавах и получения покрытий с заданными свойствами, были проведены экспериментальные исследования с различными электролитами и режимами оксидирования. Были использованы электролиты 3-х составов: 1-й состав – предварительное оксидирование в электролите состава  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (25 г/л) +  $\text{NaOH}$  (1,2 г/л) в течение 150 с с последующим оксидированием в электролите 2 технической чистоты состава  $(\text{NaPO}_3)_6$  (35 г/л) +  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (6 г/л) +  $\text{NaOH}$  (1,2 г/л); 3-й состав – только в электролите химической чистоты состава  $(\text{NaPO}_3)_6$  (35 г/л) +  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (6 г/л) +  $\text{NaOH}$  (1,2 г/л). При выборе электролита руководствовались тем, чтобы процесс оксидирования проходил стабильно, получаемые покрытия обладали равномерностью структуры и свойств по поверхности материала. Для проведения дальнейших исследований был выбран электролит № 3.

Анализ литературных источников и ранее проведенных исследований показал, что одними из основных параметров оксидирования, которые оказывают влияние на морфологию и характеристики формируемых оксидных покрытий являются плотность тока и период оксидирования. Используемая при выполнении исследований установка МДО позволяет задать режим управления током и напряжением импульсов по индивидуальному графику. Исследования по формированию оксидных покрытий выполнялись при постоянной плотности тока. Плотность тока повышалась в течение 30 с до заданного программой эксперимента значения. В электрическую цепь последовательно с нагрузкой была введена индуктивность, что позволило изменять электрические и энергетические характеристики процесса.

Были проведены исследования таких важнейших потребительских характеристик и свойств оксидных покрытий как толщина, шероховатость и микротвердость. В связи с этим были проведены исследования по установлению влияния плотности тока  $i$ , периода оксидирования  $t$  и индуктивности  $L$  на толщину, шероховатость  $R_a$  и микротвердость  $HV$  формируемых оксидных покрытий. Шероховатость поверхности определялась портативным измерителем TR200, микротвёрдость – микротвердомером HNV-2 при нагрузке 0,098 Н. Структура и толщина покрытий определялись с помощью оптического микроскопа Nikon MA200 и электронного сканирующего микроскопа Hitachi SEM S-3400N SE и BSE после приготовления поперечных шлифов.

Программа экспериментальных исследований формировалась с использованием полного факторного планирования эксперимента. С учетом предварительных исследований были выбраны следующие диапазоны режимов оксидирования для трех факторов:

- плотность тока  $i$ : 4,04 А/дм<sup>2</sup>, 15,66 А/дм<sup>2</sup>;
- период оксидирования  $t$ : 60 мин, 90 мин, 120 мин;
- индуктивность цепи  $L$ : 0,52 мГн, 4,80 мГн, 17,6 мГн, 28,0 мГн, 53,1 мГн.

Результатирующими количественными характеристиками являлись толщина, шероховатость и микротвердость сформированного оксидного слоя. Структура и морфология поверхности оксидных покрытий являлась качественной характеристикой.

Для оценки влияния наличия, структуры и свойств оксидных покрытий на свойства материала – алюминиевого сплава с керамическим покрытием, были проведены исследования усталостной долговечности и кинетики накопления усталостных повреждений образцов с оксидными покрытиями и без них. Для этого были проведены испытания на усталость в

условиях изгибных резонансных колебаний, задаваемых бесконтактным магнитодинамическим возбуждением. Напряжение испытания с целью достижения малоциклового усталости на базе испытаний, не превышающих  $10^6$  циклов, варьировалось от 170 до 210 МПа. Контролировались: частота резонансных автоколебаний образцов  $f$ , акустическая эмиссия. АЭ регистрировалась программно-аппаратным комплексом на базе АЦП РСІ-9812А при частоте дискретизации 2 МГц широкополосным преобразователем GT301 в диапазоне 50-550 кГц при усилении сигналов на 60 дБ. Для анализа АЭ использовались параметры: интегральное накопление сигналов АЭ  $N_{АЭ}$ , частотный коэффициент  $K_f$ , среднее квадратичное значение RMS. Анализ результатов выполнялся с использованием корреляционного, статистического и регрессионного методов анализа данных в программах MS Excel и Matlab.

Регистрация амплитуды цикла напряжения  $\sigma_m$  позволяет с относительно высокой точностью установить момент, при котором частота автоколебаний, свидетельствующая о начале роста магистральной усталостной трещины, будет достигать критических значений.

В третьей главе приведены результаты исследований, направленные на выбор режимов МДО, получение оксидных покрытий на деформируемых алюминиевых сплавах, последующий анализ технологических характеристик и свойств полученных покрытий с целью установления закономерности их формирования.

Толщина оксидных покрытий является одним из основных параметров, который определяет эксплуатационные и технологические характеристики изделий. Однако, учитывая нестационарное протекание процесса МДО, связь режимов оксидирования с толщиной покрытий для различных сплавов и электролитов является неоднозначной. Морфология поверхности оксидных покрытий, их твердость и шероховатость являются также важными параметрами, определяющими эксплуатационные характеристики изделий.

Выборный на основании предварительных исследований электролит №3 использовался при формировании оксидных покрытий на сплаве 7075 и проведения комплексных исследований образцов данного сплава. Предложенный ранее подход по установлению закономерности между режимами оксидирования, и параметрами оксидных покрытий, формируемых на алюминиевых сплавах (патент №2807242), апробированный при оксидировании сплавов Д16АТ и 1163, был использован при выборе электрических режимов оксидирования сплава 7075. Для этого основываясь на предположении о линейности зависимостей был проведен полный факторный эксперимент для трех факторов: плотность тока  $i$  ( $x_1$ ), период оксидирования  $t$  ( $x_2$ ) и индуктивность электрической цепи  $L$  ( $x_3$ ).

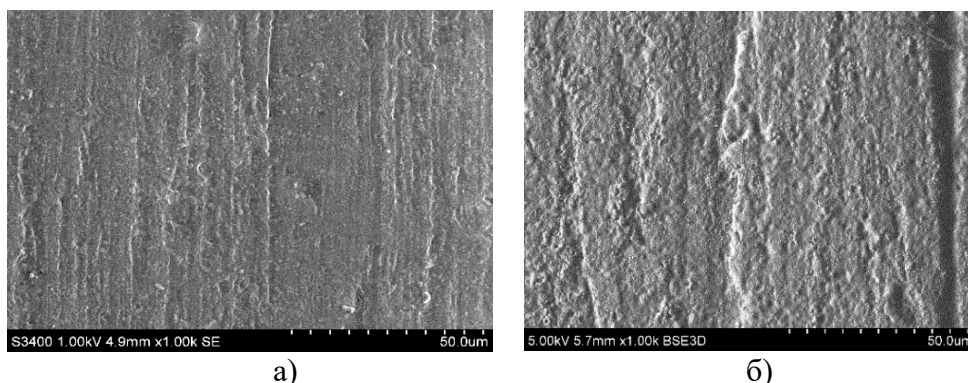


Рис. 1 – Структура поверхности образца до (а) и после МДО (б)

Предварительные исследования позволили установить граничные условия эксперимента:  $i = 4,04 \div 15,66$  А/дм<sup>2</sup>,  $t = 60 \div 120$  мин,  $L = 0,52 \div 53,1$  мГн. Выходными параметрами эксперимента являлись толщина, шероховатость  $Ra$  и микротвердость покрытия HV0,01. Шероховатость является следствием образования каналов и пор в результате плазменных искродуговых разрядов на поверхности образца.



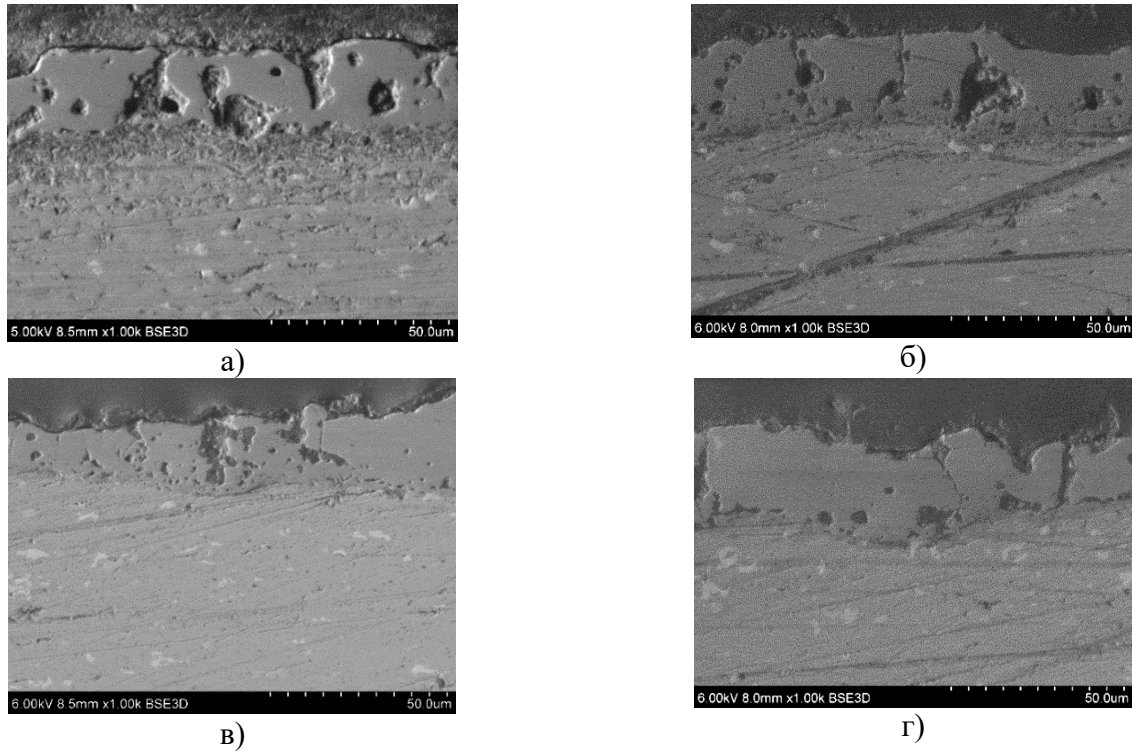


Рис. 2 – Микроструктура оксидных покрытий, сформированных на образцах сплава 7075 при  $i = 15,66 \text{ А/дм}^2$ : а)  $t = 60 \text{ мин}$ ,  $L = 0,52 \text{ мГн}$ ; б)  $t = 120 \text{ мин}$ ,  $L = 0,52 \text{ мГн}$ ; в)  $t = 60 \text{ мин}$ ,  $L = 53,1 \text{ мГн}$ ; г)  $t = 120 \text{ мин}$ ,  $L = 53,1 \text{ мГн}$

Первичная подготовка образцов состояла в их полировке не хуже  $Ra = 0,05$  для обеспечения чистоты эксперимента при определении шероховатости, так как установлено, что даже царапины глубиной 1 мкм (рис. 1) наследуются оксидным слоем при формировании покрытий толщиной 20 мкм и менее.

Таблица 1 - Исходные факторы и результаты полнофакторного эксперимента

№ эксп.	Факторы эксперимента			Экспериментальные результаты		
	Плотность тока $i$ ( $x_1$ ), $\text{А/дм}^2$	Период $t$ ( $x_2$ ), мин	Индуктивность $L$ ( $x_3$ ), мГн	Толщина покрытия $\delta$ , мкм	Шероховатость $Ra$ , мкм	Микротвердость HV0,01
1.1.	4,04	60	0,52	10	0,629	506
1.2.	15,66	60	0,52	20	1,453	735
1.3.	4,04	120	0,52	11	0,661	651
1.4.	15,66	120	0,52	30	2,380	1568
2.1.	4,04	60	53,1	12	0,670	604
2.2.	15,66	60	53,1	18	1,599	1187
2.3.	4,04	120	53,1	13	0,715	685
2.4.	15,66	120	53,1	25	2,145	1709

Для определения толщины и микротвердости покрытия после оксидирования готовились поперечные шлифы (рис. 2). Структура покрытий позволяет качественно оценить их. Покрытия, сформированные при индуктивности 0,52 мГн, имеют более крупные поры. Покрытия, полученные при низкой индуктивности, также обладают более низкой микротвердостью, что видно из таблицы 1, а в отдельных местах рыхлостью, что в некоторой степени и объясняется наличием крупных пор.

В результате регрессионного анализа, выполненного на основании полного факторного эксперимента по трем факторам, были получены следующие уравнения линейной регрессии (рассчитаны в программе MS Excel) для выходных параметров МДО покрытий,

сформированных на образцах сплава 7075:

$$\delta = 0,672 + 1,01 \cdot i + 0,0792 \cdot t - 0,0143 \cdot L \quad (1)$$

$$Ra = -0,339 + 0,105 \cdot i + 0,00646 \cdot t + 2,85 \cdot 10^{-5} \cdot L \quad (2)$$

$$HV0,01 = -390 + 64,2 \cdot i + 7,55 \cdot t + 2,35 \cdot L \quad (3)$$

Значения параметров покрытий, рассчитанные для значений исходных факторов, заданных при полном факторном эксперименте, позволили оценить достоверность линейной аппроксимации по построенным графикам зависимостей, приведенных на рис. 3.

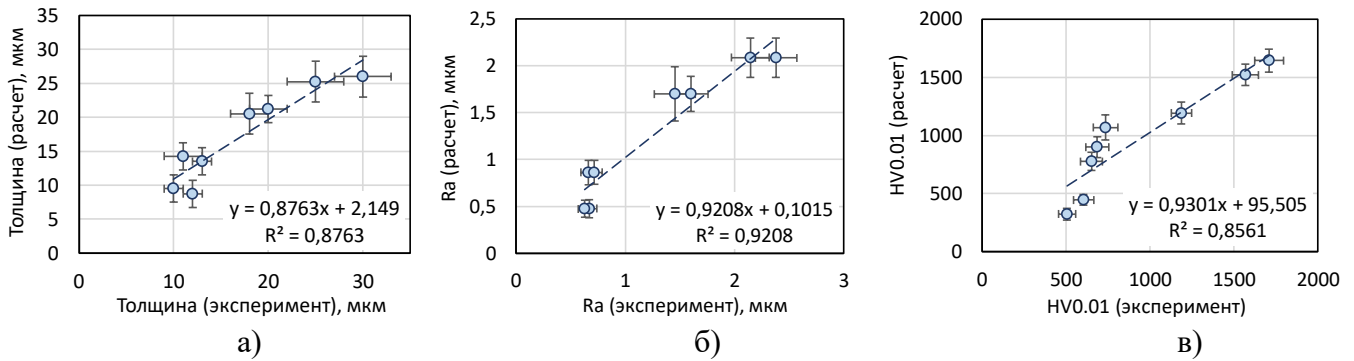


Рис. 3 – Зависимости между экспериментальными и расчетными значениями при МДО сплава 7075: а) толщины  $\delta$ , б) шероховатости  $Ra$ , в) микротвердости  $HV0,01$

Фактор значимости регрессионных моделей для каждой из трех характеристик покрытий, составивший  $p < 0,05$ , и достоверность линейной аппроксимации, приведенная на рис. 3, свидетельствуют о высокой значимости полученных регрессионных моделей.

Следующим этапом исследований являлось установление влияния индуктивности на характеристики оксидных покрытий, сформированных при МДО на образцах сплавах 7075. Внесение индуктивности повышает энергетическую эффективность МДО.

Таблица 2 – Режимы МДО и результаты расширенного эксперимента

№ эксп.	Режимы МДО			Экспериментальные результаты			Расчет по уравнениям регрессии		
	Плотность тока $i$ , А/дм <sup>2</sup>	Период $t$ , мин	Индуктивность $L$ , мГн	Толщина покрытия $\delta$ , мкм	Шероховатость $Ra$ , мкм	Микротвердость $HV0,01$	Толщина покрытия $\delta$ , мкм	Шероховатость $Ra$ , мкм	Микротвердость $HV0,01$
1.2	15,66	60	0,52	20	1,453	735	21	1,700	1069
1.4	15,66	120	0,52	30	2,380	1568	26	2,087	1522
1.5	15,66	90	0,52	25	1,748	1362	24	1,894	1295
2.2	15,66	60	53,1	18	1,599	1187	21	1,701	1193
2.4	15,66	120	53,1	25	2,145	1709	25	2,089	1646
2.5	15,66	90	53,1	21	1,980	1423	23	1,895	1419
3.1	15,66	60	4,80	21	1,575	1077	21	1,700	1079
3.2	15,66	90	4,80	27	2,173	1404	24	1,894	1305
3.3	15,66	120	4,80	32	2,948	1582	26	2,087	1532
4.1	15,66	60	17,6	23	1,268	1347	21	1,700	1109
4.2	15,66	90	17,6	30	2,031	1609	23	1,894	1336
4.3	15,66	120	17,6	35	2,486	2112	26	2,088	1562
5.1	15,66	60	28,8	26	2,568	1250	21	1,701	1134
5.2	15,66	90	28,8	36	2,694	1364	23	1,894	1360
5.3	15,66	120	28,8	39	3,109	1222	26	2,088	1586

Для более полного представления о влиянии индуктивности на процесс МДО, резуль-

таты полного факторного эксперимента были дополнены серией более подробных экспериментов в пределах заданных первичных интервалов. Режимы МДО расширенного эксперимента и значения параметров покрытий, полученные при проведении эксперимента и в результате расчета по уравнениям регрессии (1-3), приведены в таблице 2.

Характер отклонения от экспериментальной модели значений параметров покрытий, которые можно было бы получить расчетным путем на основании полученных уравнений линейной регрессии, продемонстрирован на рис. 4. Отклонение значений от расчетной модели на диаграммах зависимости по толщине и шероховатости покрытия наблюдается для режима с заданной индуктивностью  $L = 28$  мГн, а на диаграмме зависимости по микротвердости – для режима с заданной индуктивностью  $L = 17,6$  мГн. Для всех экспериментов по данным режимам наблюдается занижение расчетных значений относительно экспериментальных данных. Это говорит о том, что модель на всем промежутке не является линейной.

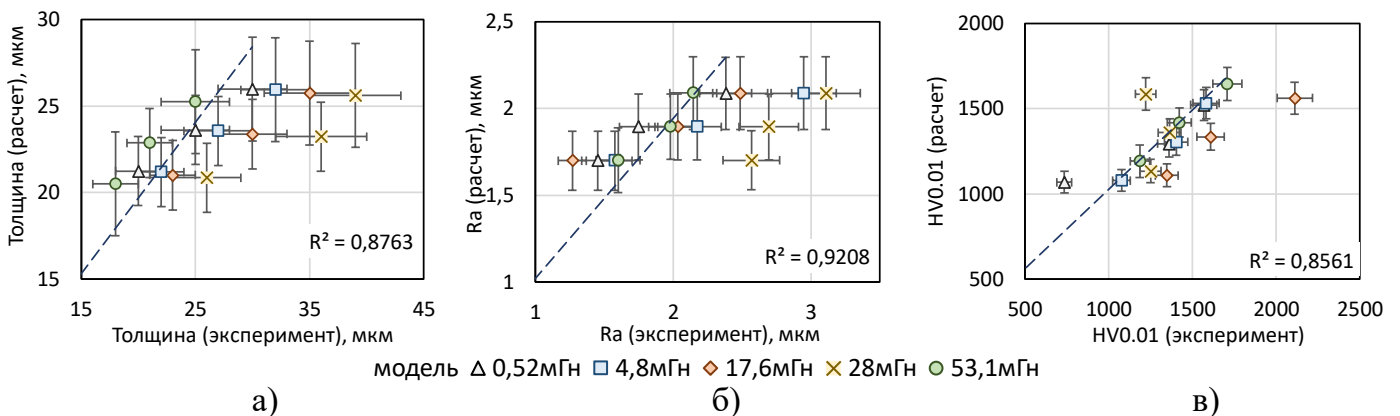


Рис. 4 – Зависимости между экспериментальными и расчетными значениями при МДО сплава 7075: а) толщины, б) шероховатости  $Ra$ , в) микротвердости HV0,01

На основании анализа зависимости значений параметров сформированных оксидных покрытий от индуктивности можно сделать вывод о нелинейном влиянии индуктивности на все измеряемые параметры (рис. 5).

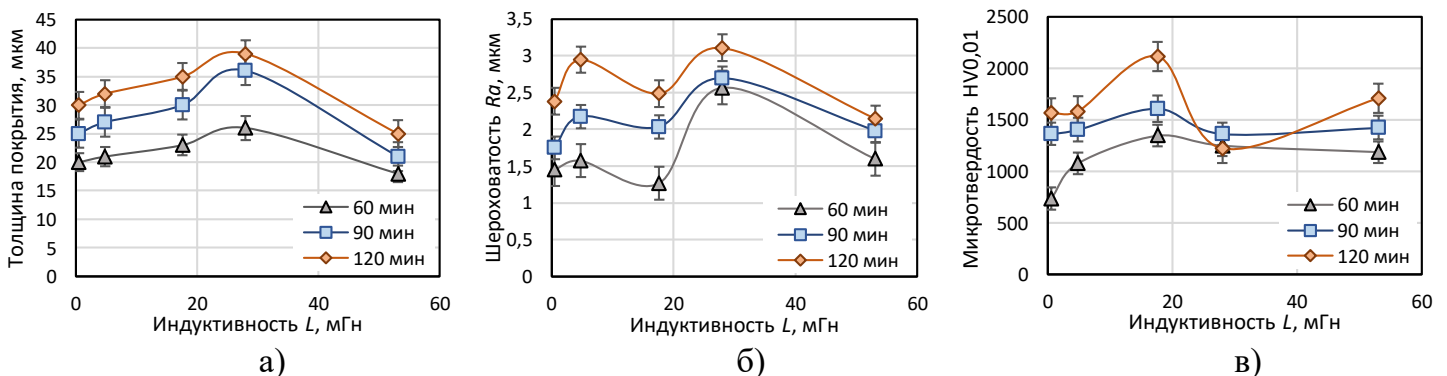


Рис. 5 – Зависимости параметров оксидных покрытий от индуктивности  $L$ : а) толщины, б) шероховатости  $Ra$ , в) микротвердости HV0,01

Из анализа диаграмм видно, что введение максимальной, заданной границами эксперимента, индуктивности  $L = 53,1$  мГн снизило толщину и практически не повлияло на значения шероховатости и твердости оксидного покрытия. Однако, увеличение индуктивности от 0,52 до 28 мГн способствовало монотонному росту толщины покрытия. Кроме того, введение индуктивности 17,6 мГн привело к повышению микротвердости покрытий, формируемых во всем диапазоне исследуемого периода оксидирования от 60 до 120 мин в сравнении с другими значениями индуктивности. Объяснить это можно при изучении структуры оксидных покрытий (рис. 6).

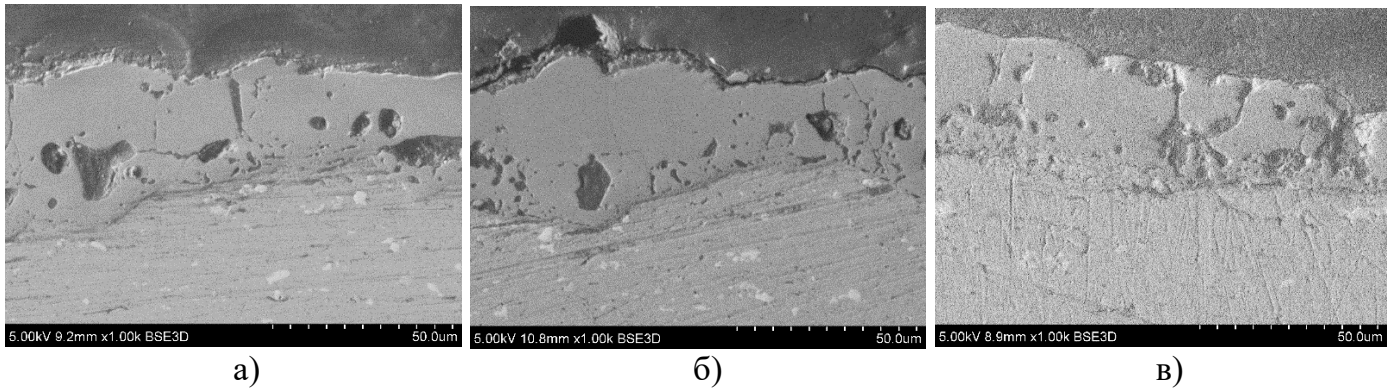


Рис. 6 – Структуры оксидных покрытий, сформированных в течение 120 мин при индуктивности  $L$ : а) 4,8 мГн (11), б) 17,6 мГн (13), в) 28 мГн (22)

Структура покрытия образца, сформированного в течение 120 мин при индуктивности цепи 17,6 мГн (рис. 6,б) не отличается абсолютной сплошностью по всей сформированной поверхности, однако, наиболее часто встречаются крупные участки с высокой сплошностью и микротвердостью более 2000 HV0,01. Напротив, в большей части исследованных областей покрытия, сформированного при индуктивности 4,8 мГн, отсутствуют крупные участки, обладающие высокой сплошностью, наблюдаются скопления мелких пор размером менее 2 мкм (рис. 6,а). В покрытии, сформированном при индуктивности 28 мГн наблюдаются тонкие сквозные каналы и также мелкие поры, область, граничащая с подложкой, имеет сетку мелких пор (рис.6,в). Наличие пор на поверхности сказывается на высоких значениях шероховатости. Покрытия, сформированные при самом низком значении индуктивности 0,52 мГн имеют часто расположенные сквозные каналы (рис. 2,б), а при индуктивности 53,1 мГн (рис. 2,г) – крупные поры, при наименьшей толщине оксидного покрытия в сравнении с другими, полученными в равных прочих условиях образцами.

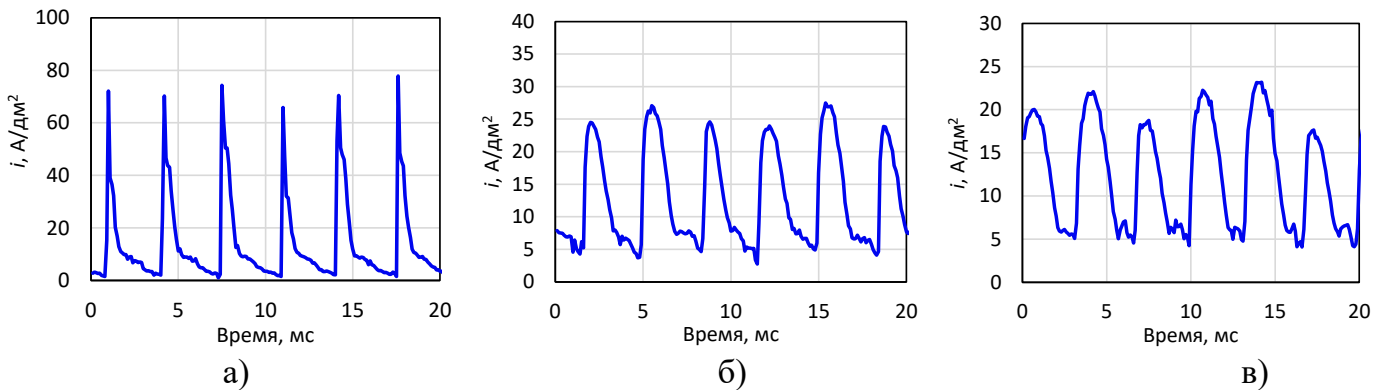


Рис. 7 – Форма импульсов тока при микродуговом оксидировании образцов сплава 7075 с индуктивностью  $L$  в цепи: а) 0,52 мГн, б) 28 мГн, в) 53,1 мГн

Объяснение причин столь нелинейной зависимости параметров покрытий от значений индуктивности может быть найдено при анализе электроэнергетических характеристик МДО. Импульсы тока, задаваемые управляемым генератором при достаточной для этого амплитуде напряжения, обеспечивают электрический и тепловой пробой оксидной пленки, образованной на поверхности металла, а, по мере ее роста, и керамического покрытия. Введение в электрическую цепь источника МДО последовательно расположенной индуктивности, приводит к снижению амплитуды и увеличению коэффициента заполнения  $D$  импульса и его длительности (рис. 7). Система автоматического управления генератором обеспечивает поддержание постоянным среднего значения плотности тока. Однако, энергетическая характеристика импульсного напряжения, а именно, энергия потребления, определяется действующим значением плотности тока и коэффициентом заполнения импульса. Значения

действующего значения плотности тока и коэффициента заполнения имеют взаимно обратную зависимость, а потребленная энергия  $P \cdot t$  имеет обратно пропорциональную нисходящую зависимость от индуктивности (рис. 8).

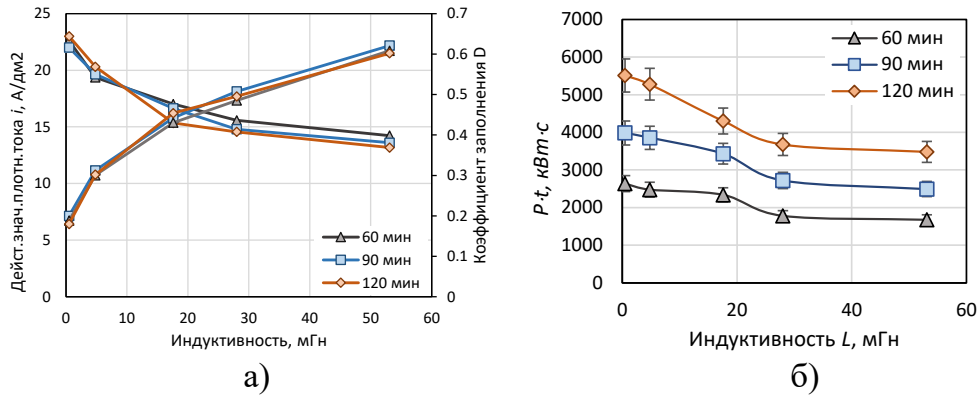


Рис. 8 – Зависимости действующего значения плотности тока  $i$ , коэффициента заполнения импульса  $D$  (а) и потребленной при МДО энергии  $P \cdot t$  (б) от индуктивности

При отсутствии индуктивности или малом ее значении высокая скорость нарастания импульсного напряжения приводит к значительному опережению тока, протекающего через оксидный слой в результате лавинного процесса электрического и теплового пробоя (рис. 9,а). Увеличение индуктивности приводит к некоторому запаздыванию роста напряжения на оксидном слое в результате скачка напряжения на индуктивности в начальный момент. Эти изменения можно наблюдать на графике зависимости отношения приращения тока к приращению напряжения  $di/dU$  (рис. 9,в), полученные по расчету, выполненному на линейном участке вольт-амперной характеристики (ВАХ) (рис. 9,б), построенной на основании восстановленной диаграммы напряжения и тока импульса.

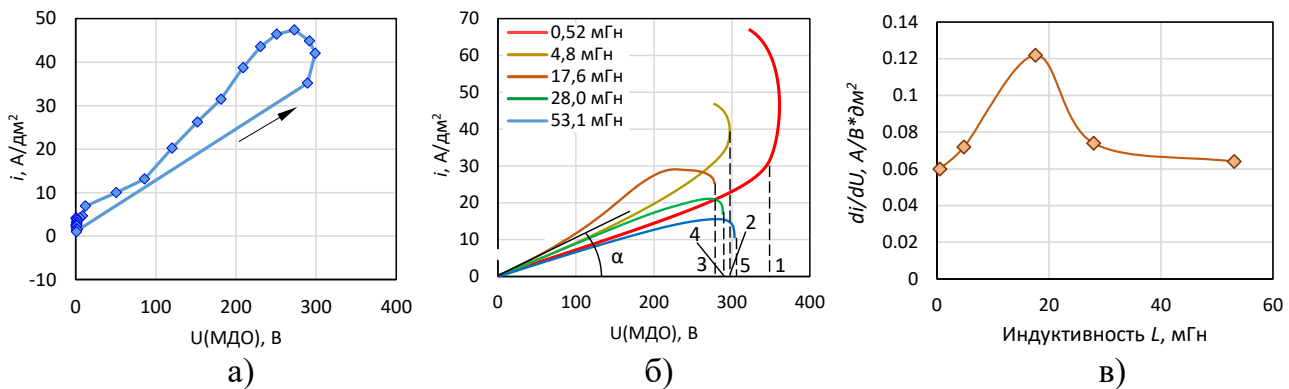


Рис. 9 – Вольт-амперная характеристика импульса при индуктивности 4,8 мГн (а), сглаженные графики ВАХ (б) и отношение  $di/dU$  на прямолинейном участке ВАХ зоны металл-оксид-электролит при МДО сплава 7075 с различной индуктивностью цепи

Рост значения  $di/dU$  происходит до значения индуктивности 17,6 мГн. Дальнейшее увеличение индуктивности приводит к снижению отношения  $di/dU$ .

Наблюдается качественное сходство полученной зависимости отношения  $di/dU$  (рис. 9,в), микротвердости и толщины покрытий (рис. 5,а,в) от индуктивности цепи. Введение в электрическую цепь реактивного сопротивления приводит к увеличению длительности тока разряда с одной стороны, что способствует увеличению времени жизни микродугового разряда, и к снижению энергии импульса с другой стороны, что снижает тепловую энергию его воздействия. Тепловой пробой, сопровождающийся увеличением тока при снижении напряжения на оксидном слое, наблюдается лишь при значениях индуктивности 0,5

и 4,8 мГн. При дальнейшем увеличении индуктивности до значений 28 и 53,1 мГн, увеличение скорости изменения тока приводит к уменьшению электрического потенциала на оксидном слое и «гашению» зоны пробоя. При высоких значениях индуктивности это наблюдается на диаграмме ВАХ. Анализ морфологии поверхности сформированных при различной индуктивности оксидных покрытий это подтверждает (рис. 10).

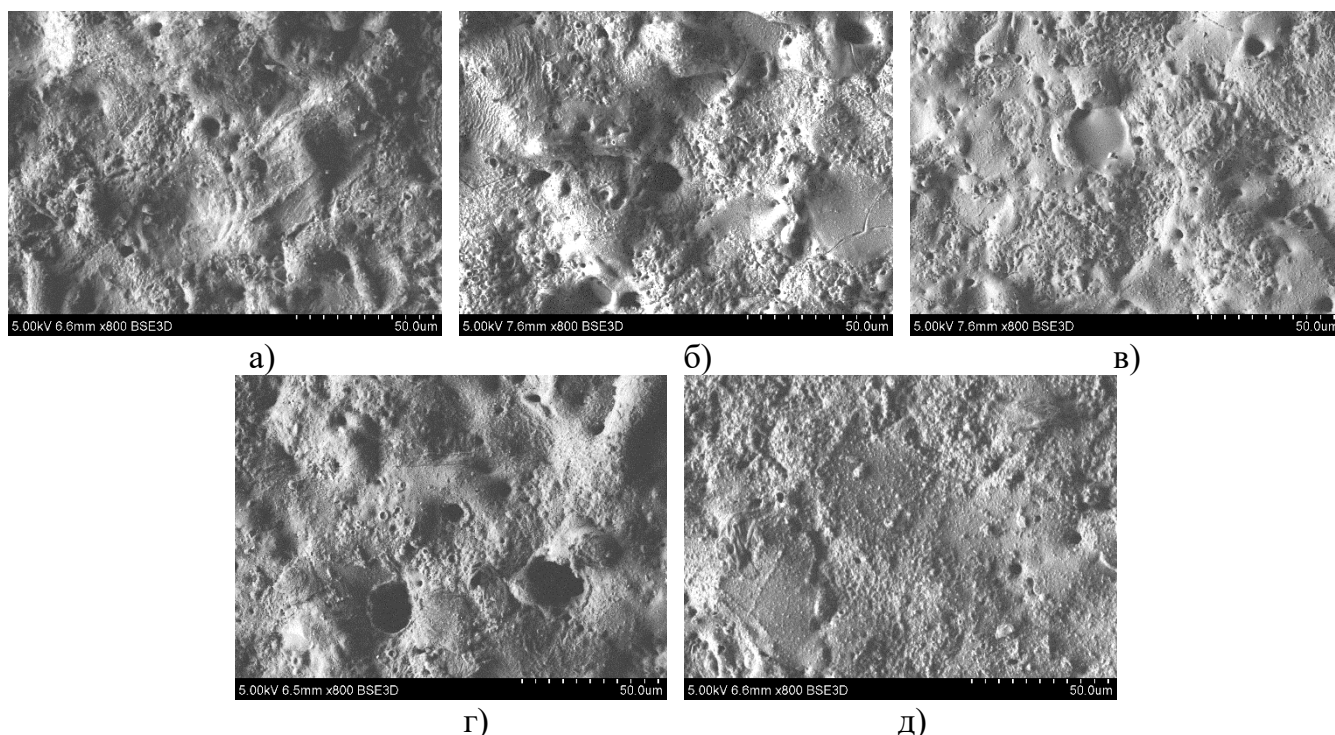


Рис. 10 – Морфология поверхности образцов сплава 7075 после МДО в течение 120 мин при индуктивности: а) 0,52 мГн, б) 4,8 мГн, в) 17,6 мГн, г) 28 мГн, д) 53,1 мГн

Поверхности образцов сплава 7075, сформированные при индуктивности цепи 17,6 мГн и 53,1 мГн, имеют наименьшее число пор. Поверхностные поры имеют размеры не более 5 мкм, кратеры каналов как правило равномерно заполнены расплавом, что подтверждает отсутствие разбрызгивания. На покрытиях, сформированных при индуктивности 28 мГн, наблюдается большее количество крупных открытых пор, что подтверждает также наибольшую измеренную шероховатость покрытий при наибольшей средней толщине покрытий.

В четвертой главе приведены результаты исследования влияния оксидных покрытий, сформированных при МДО на алюминиевых сплавах, на показатели их циклической долговечности и развитие усталостных повреждений.

Испытания проводились на образцах из алюминиевого сплава 7075 на установке с бесконтактным электромагнитным нагружением в сопровождении метода АЭ. Для установления влияния МДО покрытий на эволюцию усталостных повреждений на образцах без покрытия были определены параметры нагружения, позволяющие проводить испытания на базе менее  $10^6$  циклов. Для исследований был выбран участок диаграммы Веллера в диапазоне напряжений цикла: 170, 180, 190, 210 МПа.

Для испытаний были подготовлены образцы с оксидными покрытиями, сформированными при индуктивности, равной 17,6 мГн, по результатам исследований параметров которых было установлено оптимальное сочетание толщины и шероховатости при высоком значении микротвердости.

Диаграмма зависимости частоты резонансных колебаний при испытании образца является информативной характеристикой процесса накопления усталостных повреждений, так как период от  $N_{нач.}$  до  $N_{кон.}$  может является индикатором роста магистральной трещины

(рис. 11,а). Представленная на рис. 11(б) диаграмма Веллера хорошо аппроксимируется степенной функцией с получением зависимости между амплитудой напряжения цикла от числа циклов до разрушения или образования магистральной трещины  $\sigma_M = 513,01N^{-0,092}$ .

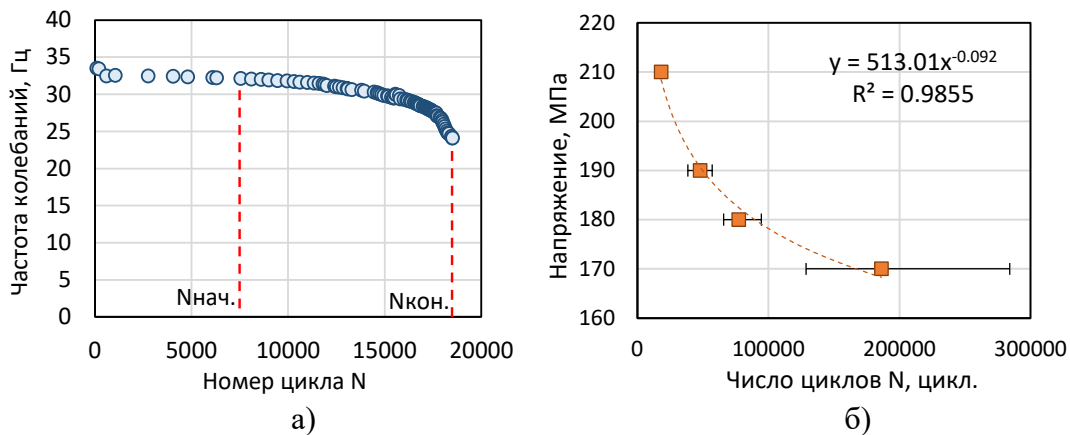


Рис. 11 – Диаграммы: а) частоты автоколебаний образца  $f$  от номера цикла  $N$  ( $\sigma_M=210$ МПа), б) усталости по результатам испытаний образцов сплава 7075 без МДО

После остановки испытания образцы снимались с испытательной остановки и выполнялся анализ размеров трещин на боковых поверхностях (рис. 12). Расчетным путем определялся суммарный размер магистральных трещин с обеих сторон, ослабляющих сечение образца.

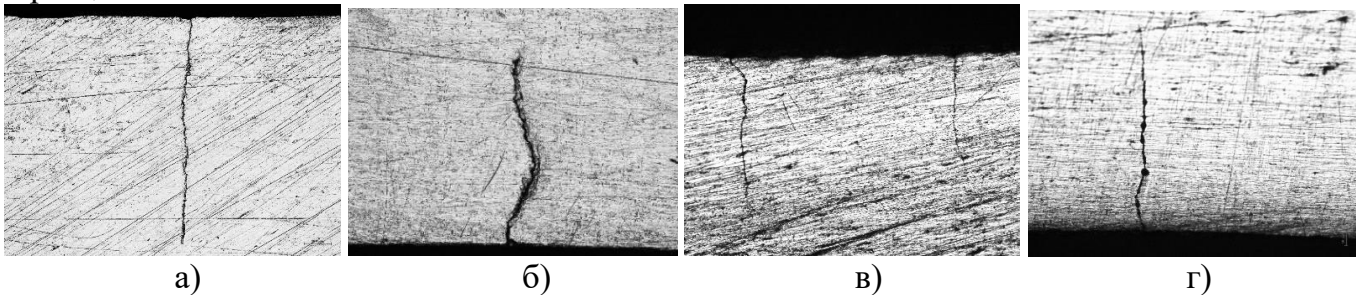


Рис. 12 – Фото трещин образцов без МДО после 284222 циклов при 170 МПа (а) и 18517 циклов при 210 МПа (б) и образцов с МДО покрытием, полученным в течение 60 мин после 85363 циклов (в) и в течение 90 мин после 106567 (в) циклов при 180 МПа

По результатам расчетов были построены зависимости, определяющие связи между изменением частоты резонансных колебаний образца, суммарной длиной магистральных трещин и вновь введенным коэффициентом  $K_N = (N_{кон.} - N_{нач.}) / N_{кон.}$ , определяющим отношение числа циклов в период развития магистральной трещины к общему числу циклов (рис. 13).

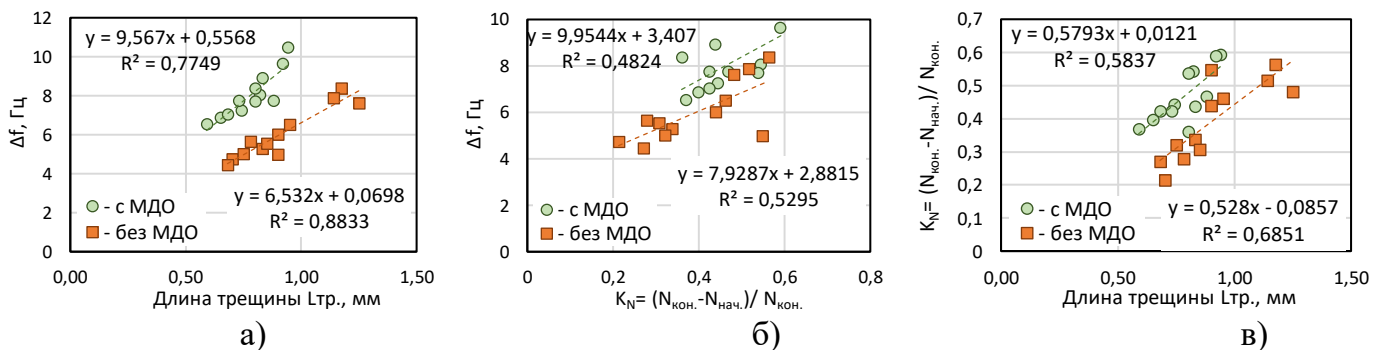


Рис. 13 – Зависимости, полученные после испытания образцов сплава 7075: а)  $\Delta f(L_{тр.})$ , б)  $\Delta f(K_N)$ , в) от  $K_N(L_{тр.})$

Из построенных зависимостей можно видеть, что снижение частоты колебаний при испытании, вызванное ростом магистральной трещины, в образцах с покрытием происходит быстрее, об этом свидетельствует большее значение коэффициента уравнения линейной аппроксимации. Однако стоит отметить, что одна и та же длина выросшей магистральной трещины образуется при меньшем относительном периоде ее роста, определяемом коэффициентом  $K_N$ . Диаграммы Веллера, построенные на основании результатов испытаний, приведены на рис. 14.

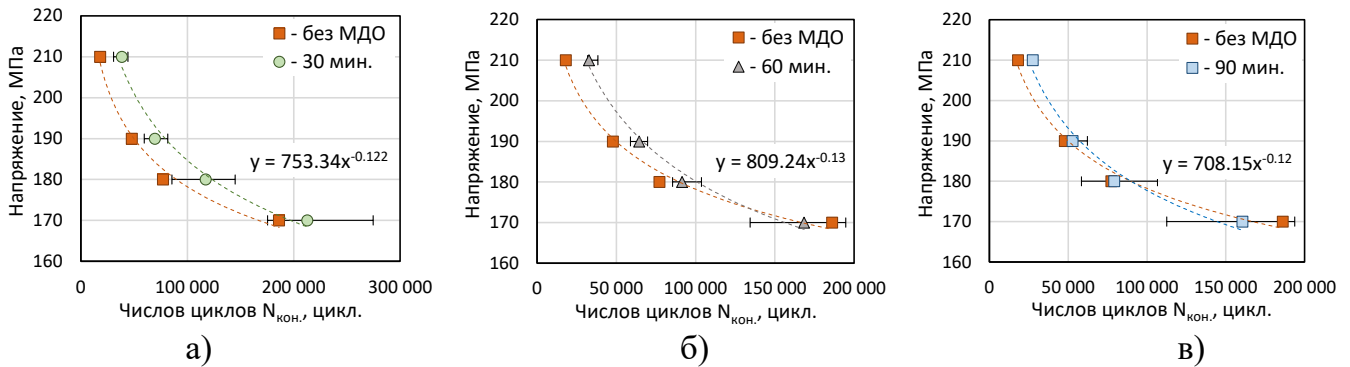


Рис. 14 – Диаграммы усталости по результатам усталостных испытаний образцов сплава 7075 с МДО, выполненным в течение: а) 30 мин, б) 60 мин, в) 90 мин

Можно отметить, что на высоких значениях напряжений цикла от 180 до 210 МПа долговечность образцов с оксидными покрытиями превышает долговечность образцов без покрытий для всех периодов оксидирования. Однако при наименьшем из серии испытаний напряжении цикла 170 МПа, долговечность образцов с покрытием, сформированным в течение 30 мин, и образцов без МДО практически равны. Установлено, что увеличение долговечности для всех периодов оксидирования, рассматриваемых при выполнении исследования (30-90 мин), наблюдается лишь для больших значений амплитуд цикла  $\sigma_M = 210$  МПа. При этом, с увеличением периода оксидирования, то есть толщины оксидного слоя с 17 до 36 мкм, увеличение долговечности относительно образцов без оксидного покрытия снижается с 114 до 52 % (рис. 15).

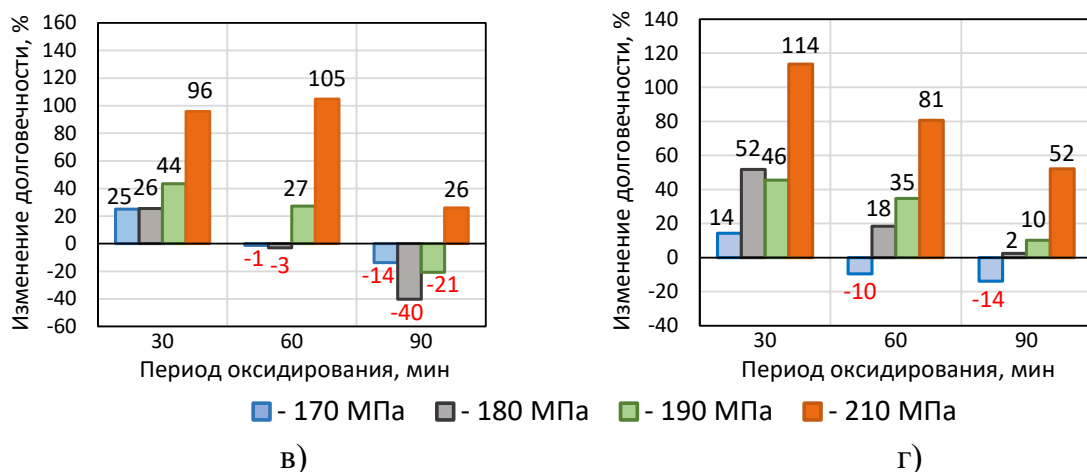


Рис. 15 – Диаграммы изменения долговечности образцов сплава 7075 с оксидными покрытиями в сравнении с образцами без покрытия: а) до  $N_{нач.}$ , б) до  $N_{кон.}$

Повышение долговечности на 25-96 % образцов с оксидным покрытием толщиной  $< 20$  мкм, формируемым в течение 30 мин, наблюдается не только для больших напряжений цикла  $> 200$  МПа, но и во всем исследованном диапазоне напряжений от 170 до 210 МПа.

Для анализа данных АЭ были выбраны несколько параметров. Классический анализ



процесса разрушения с использования метода АЭ заключается в оценке накопления суммарной АЭ регистрируемых сигналов АЭ. Такой подход позволяет оценивать высвобожденную энергию как количественную характеристику единичных актов разрушения, однако, не позволяет дать характеристику типа повреждения материала.

Для этого использовался подход к анализу частотно-энергетического распределения сигналов АЭ, а именно зависимости среднеквадратического значения сигнала (RMS) от частотного параметра  $K_f$ . Этот подход ранее использовался при анализе эволюции дефектной структуры при деформации сталей и сплавов без покрытий в условиях статических и циклических нагрузок. RMS – энергетическая характеристика сигнала, подобная энергии.  $K_f$  показывает вклад частотных компонент в сигнал АЭ в целом и рассчитывается на основе вейвлет разложения сигналов АЭ. После испытаний на основании зависимости  $RMS(K_f)$  полезные сигналы были отделены от шумов. Сигналы при  $K_f < 6$  были признаны шумами, вызванными периодическим механическим трением образца в месте закрепления или электромагнитными помехами (рис. 16).

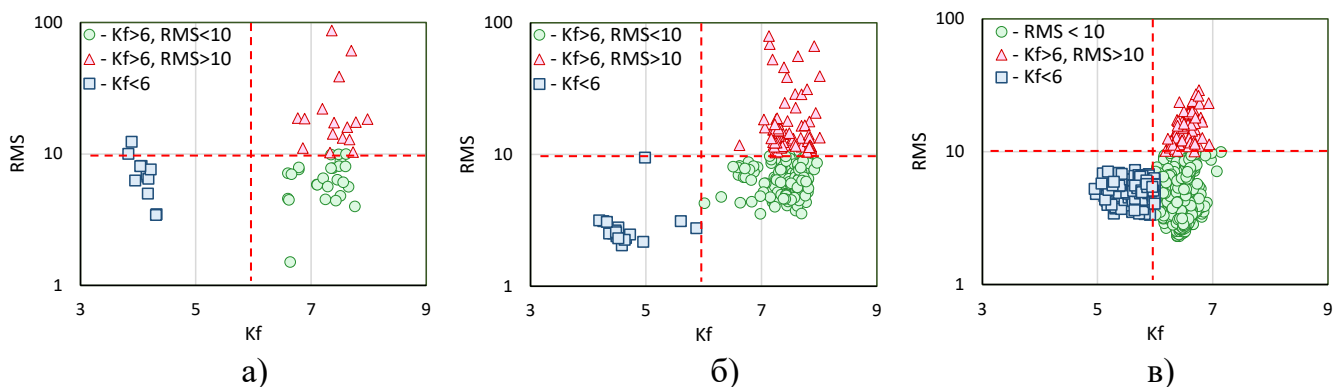


Рис. 16 – Двухпараметрическое распределение параметров АЭ  $RMS(K_f)$ , зарегистрированных при усталостном испытании образцов: а) сплава 7075 с МДО покрытием 25 мкм, б) сплава 7075 без покрытия и в) сплава 1163 без покрытия.

По результатам множественных статических и циклических испытаний образцов сплавов 7075, Д16АТ, 1163 по параметру RMS был установлен условный порог, разделяющий источники сигналов АЭ на регистрируемые при пластической деформации ( $RMS < 10$ ) и при хрупком разрушении ( $RMS > 10$ ). Границы заданы для условий испытаний и оборудования, используемых в данном эксперименте. При смене условий или оборудования испытания порог может измениться.

На рис. 17,18 приведены зарегистрированные параметры АЭ и результаты испытаний образцов алюминиевых сплавов с МДО покрытиями и без покрытий. Все образцы поведены до развития в них магистральной трещины, что определено в процессе ее роста по снижению частоты резонансных колебаний образца и подтверждено в последствии измерением параметров трещин при микроструктурном анализе.

Особенностью, выявленной по параметрам АЭ, регистрируемым при множественных испытаниях образцов, является характер накопления интегральной кривой суммарной АЭ. Приведенная диаграмма накопления сигналов АЭ во времени показывает активность актов высвобождаемой упругой энергии при развитии усталостных повреждений в условиях циклического нагружения образцов. Регистрация сигналов АЭ, включая сигналы от образующихся микротрещин ( $RMS > 10$ ), начинается сразу после начала испытания и имеет снижающуюся активность при приближении к моменту начала  $N_{нач.}$  снижения частоты автоколебаний  $f$ , что связано с началом роста магистральной трещины.

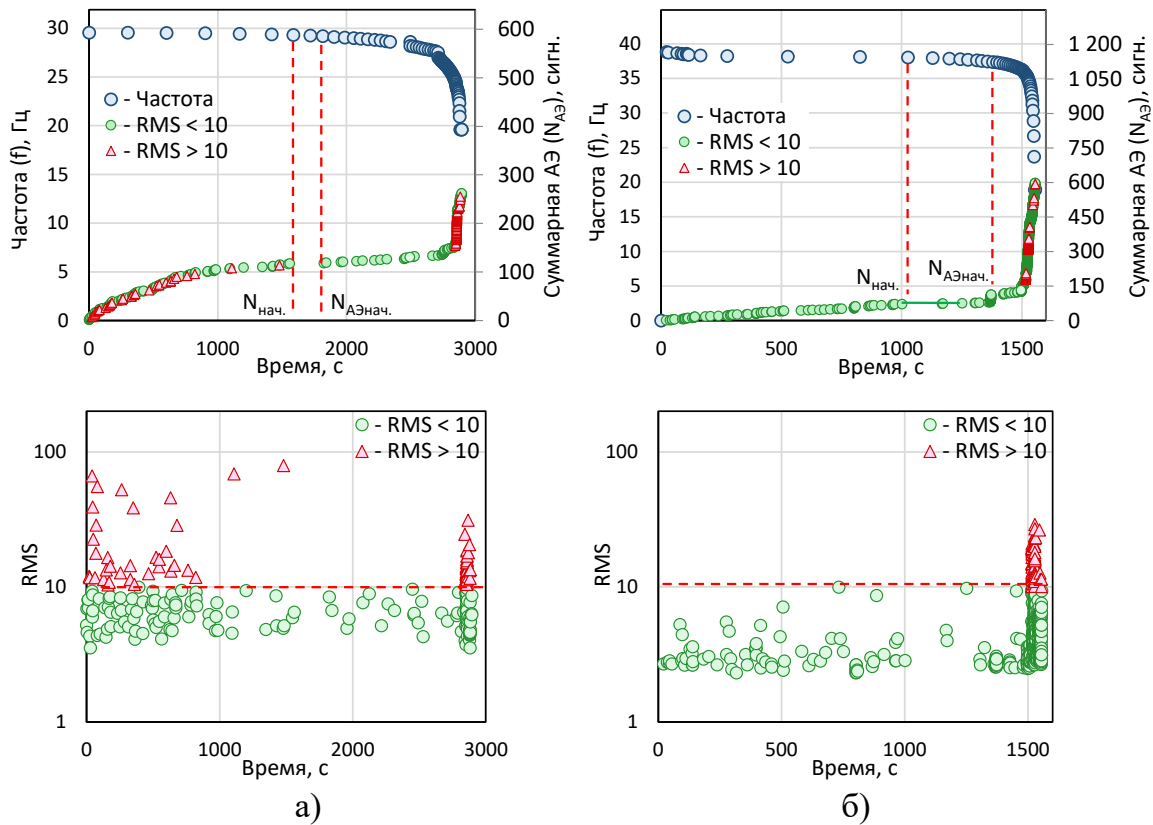


Рис. 17 – Диаграммы изменения частоты колебаний  $f$ , суммарной АЭ ( $N_{AE}$ ) и RMS сигналов во времени при усталостных испытаниях образцов сплава: а) 7075, б) D16AT

Возобновление активности АЭ начинается спустя некоторый период испытания при незначительном падении частоты  $f$ , что, согласно установленной по диаграмме рис. 14,а зависимости, соответствует приращению трещины не более, чем на 40 мкм. Это свидетельствует о том, что активность сигналов АЭ возобновляется по окончании инкубационного периода в момент, когда трещина начинает свой рост.

При регистрации сигналов без оксидных покрытий фактора сдерживающего пластическую деформацию в наружных слоях циклически деформируемого материала не наблюдается. Так, при испытании образцов сплава 7075 без оксидных покрытий не наблюдается регистрации сигналов АЭ практически до активного снижения частоты автоколебаний  $f$ , что происходит при приращении магистрально трещины до 0,3 мм и более (рис. 18,а).

При этом на протяжении всего испытания образцов сплава деформируемого сплава D16AT в течение инкубационного периода и далее при росте магистральной трещины регистрируется большое число сигналов дислокационного типа ( $RMS < 10$ ). Это объясняется наличием на поверхности образцов плакирующего слоя алюминия (рис. 18,б) и проявлением механизма дисперсионного деформационного упрочнения.

Микроструктурный анализ не позволил выявить на поверхности покрытий образование трещин, что связано с неравномерностью самого покрытия и первичных дефектов в виде пор и трещин еще до начала испытания. Это хорошо видно при изменении плотности тока оксидирования в образцах деформируемого сплава 1163 (рис. 19).

Однако, косвенно по регистрируемой АЭ можно с уверенностью утверждать об образовании микрповреждений в покрытии образцов, так как в ряде образцов без покрытий сигналы АЭ не регистрируются в течение длительного периода после начала роста магистральной трещины. Отмеченный характер регистрации повреждений свидетельствует не о том, что они отсутствуют на данной стадии циклической деформации, а о том, что развитие повреждений протекает по пластическому механизму, а регистрируемые сигналы находятся

ниже порога чувствительности аппаратуры.

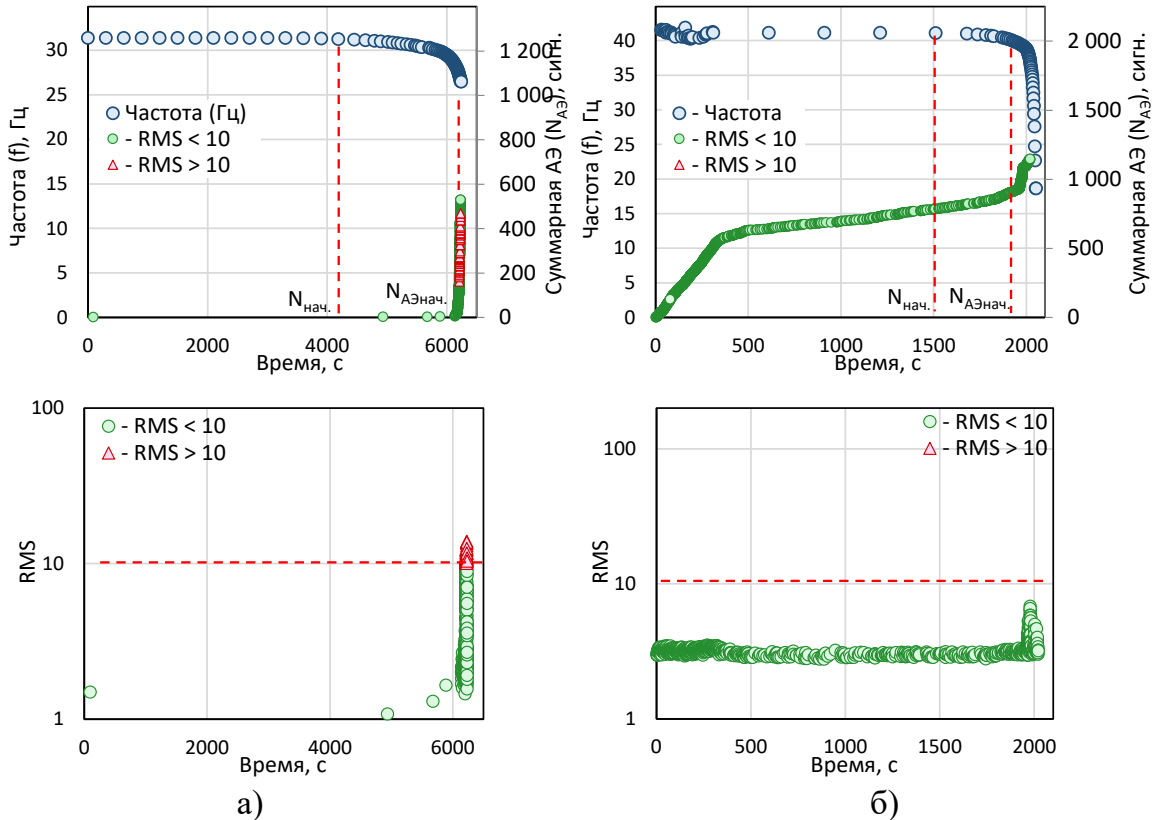


Рис. 18 – Диаграммы изменения частоты колебаний  $f$ , суммарной АЭ ( $N_{АЭ}$ ) и RMS сигналов во времени при усталостных испытаниях образцов сплава:  
а) 7075 при  $\sigma_M = 180$  МПа, б) Д16АТ при  $\sigma_M = 200$  МПа

Подтверждением этого является вид поверхности трещин на образцах без оксидного покрытия и с покрытием (рис. 20). На подавляющей части образцов без покрытий видны следы пластической деформации в области продвижения трещины.

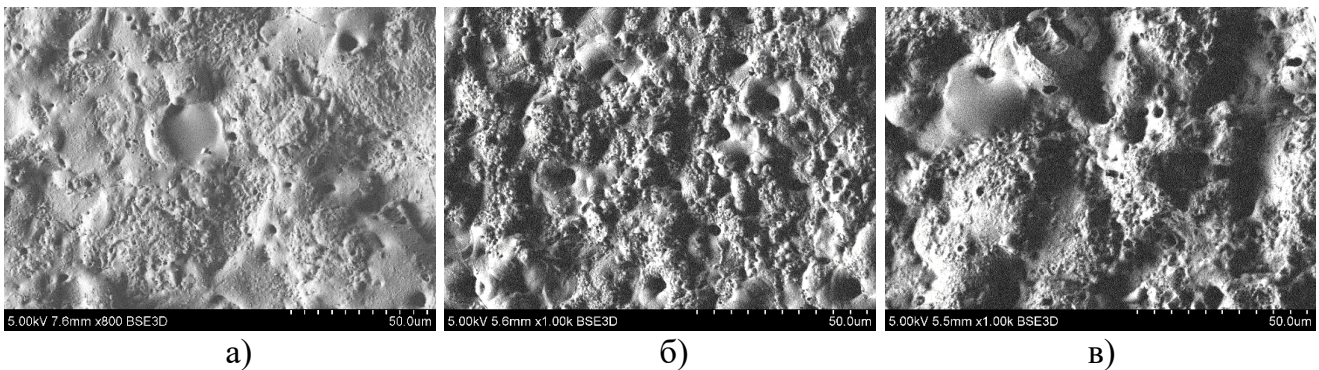


Рис. 19 – Структура поверхности образцов после МДО при плотности тока:  
а) сплава 7075 при  $i = 15,66$  А/дм<sup>2</sup>, сплава 1163 при б)  $i = 22$  А/дм<sup>2</sup>, в)  $i = 48$  А/дм<sup>2</sup>

Однако следов деформаций не отмечено в местах роста трещин на образцах с оксидными покрытиями. Отмеченный факт также позволяет обосновать причину более высокой долговечности образцов с наличием оксидного слоя в сравнении с образцами без покрытий.

Объясняются полученные результаты тем, что оксидное покрытие сдерживает развитие и миграцию поверхностных дефектов в пластичной подложке в инкубационный период накопления усталостных повреждений большого уровня.

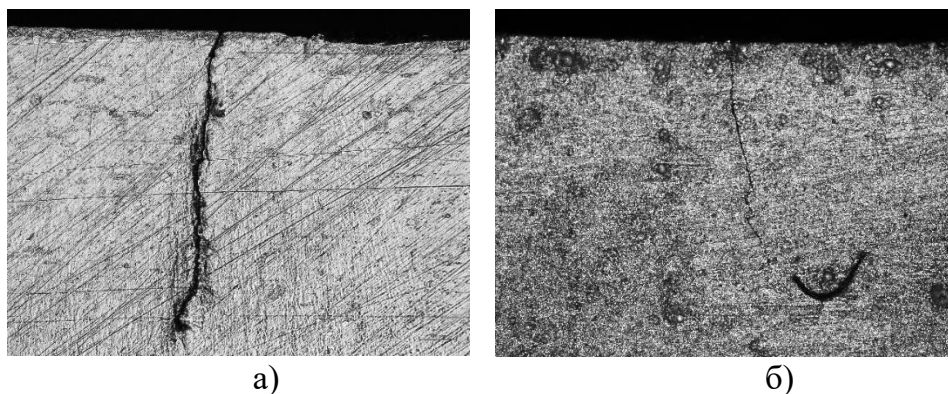


Рис. 20 – Поверхность образцов сплава 7075 после усталостного испытания:  
а) без оксидного покрытия, б) с оксидным покрытием

Однако при меньших напряжениях цикла, оксидный слой толщиной более 20 мкм при значительном числе циклов деформаций приводит к образованию трещины в одном из мест покрытия, обеспечивая в этом месте диссипацию энергии. Образовавшаяся трещина является концентратором напряжений, способствующих локализации деформации и более высокой скорости роста трещины при сдерживании развития деформации в остальной области образца, где трещины отсутствуют.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решена важная научно-практическая задача по установлению закономерностей формирования структуры и свойств оксидных покрытий, получаемых на деформируемых алюминиевых сплавах в процессе МДО, и их влиянии на циклическую долговечность и особенности усталостного разрушения алюминиевых сплавов с оксидными покрытиями. При выполнении исследований получены следующие научные и практические результаты:

1. Установлены закономерности между факторами, определяющими режимы оксидирования, такими как плотность тока, период оксидирования, индуктивность электрической цепи и характеристиками оксидных покрытий, формируемых на алюминиевых сплавах методом МДО. Предложен электролит для МДО на основе водного раствора гексаметафосфата, силиката и гидроксида натрия, позволяющий получать на деформируемых алюминиевых сплавах более равномерный оксидный слой в сравнении с электролитом на основе силиката и гидроксида натрия.

2. Увеличение периода оксидирования при МДО деформируемых алюминиевых сплавов 7075, Д16АТ, 1163 с использованием предложенного электролита обеспечивает пропорциональный рост толщины оксидных покрытий. При увеличении толщины оксидных покрытий возрастает шероховатость поверхности, что связано с пропорциональным ростом энергии импульсов при постоянной плотности тока оксидирования. Плотность тока и индуктивность являются одними из основных факторов, оказывающих влияние на пористость структуры и микротвердость сформированного оксидного покрытия. Установлено, что увеличение микротвердости оксидного слоя, сформированного на образцах сплава 7075 при плотности тока  $15,66 \text{ А/дм}^2$ , происходит в диапазоне изменения индуктивности от 0,52 до 17,6 мГн, что вызвано ростом длительности тока разряда, и времени жизни микродугового разряда. Дальнейшее увеличение индуктивности до 53,1 мГн приводит к снижению микротвердости, что вызвано снижением электрического потенциала формирования оксидного слоя и «гашением» зоны пробоя.

3. Установлена закономерность снижения частоты резонансных автоколебаний и периода роста трещин по отношению к долговечности от длины растущих усталостных магистральных трещин, выявленная при испытаниях на малоцикловую усталость образцов алюминиевого сплава 7075 на базе не более  $10^6$  циклов. Для образцов с оксидными покрытиями

наблюдается большее снижение частоты резонансных колебаний и более раннее образование магистральных трещин по отношению к циклической долговечности, а также увеличение циклической долговечности при напряжении цикла более 180 МПа, в сравнении с образцами без оксидных покрытий.

4. Наличие оксидных покрытий, формируемых на алюминиевых сплавах методом МДО, способствует увеличению долговечности при циклической деформации изгибом. При этом для образцов сплава 7075 с оксидными покрытиями толщиной 17-36 мкм, сформированными в течение 30-90 мин, установлено увеличение долговечности на 52-114 %, в сравнении с образцами без покрытий при амплитуде напряжения цикла  $> 200$  МПа. Причем, с увеличением периода оксидирования, то есть толщины оксидного слоя, приращение долговечности уменьшается.

5. Установлено, что в более широком диапазоне напряжений цикла 170-210 МПа, заданного рамками проводимых исследований, наблюдается повышение на 25-96 % долговечности при усталостном испытании образцов алюминиевого сплава 7075 с оксидным покрытием толщиной  $< 20$  мкм, определяемые периодом оксидирования 30 мин. Это вызвано сдерживающим фактором формирования усталостных повреждений в инкубационный период усталости, при котором оксидный слой до момента его разрушения препятствует развитию микропластической деформации в наружных слоях пластичной подложки в условиях знакопеременного нагружения изгибом. Активное накопление повреждений в подложке происходит только в местах локального образования трещин.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК*

1. Исследование влияния режимов микродугового оксидирования на морфологию и параметры оксидного покрытия, наносимого на алюминиевый сплав Д16АТ / Ф. Бао, О.В. Башков, Д. Чжан, Л. Люй // *Frontier Materials & Technologies*. – 2023. – № 1. – С. 7-21. – DOI 10.18323/2782-4039-2023-1-7-21.

2. Усталостное разрушение алюминиевого сплава 1163 с различной морфологией оксидного покрытия / Ф. Бао, Л. Люй, О. В. Башков // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2024. – Т. 20, № 1(229). – С. 3-7. – DOI 10.36652/1813-1336-2024-20-1-3-7.

3. Моделирование влияния индуктивности на параметры оксидных покрытий, формируемых на алюминиевом сплаве методом микродугового оксидирования / О. В. Башков, Л. Люй, Ф. Бао [и др.] // *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*. – 2024. – № 7(79). – С. 107-113.

### *Публикации в других зарубежных изданиях, входящих в наукометрические базы данных, приравненные к журналам Перечня ВАК:*

4. Acoustic emission at the fatigue crack initiation and propagation in aluminum alloy 1163 with micro-arc oxidation coating / F. Bao, T.I. Bashkova, L. Lyu // *AIP Conf. Proc.* – 2023. – Vol. 2899. – P. 020011. DOI: 10.1063/5.0163781.

### *Публикации в других изданиях*

5. Research of the properties and characteristics of oxide coatings formed during the process of microarc oxidation in an electrolyte based on sodium hexametaphosphate holes / O.V. Bashkov, L. Lyu, F. Xiao, Z Zhao // *Journal Of Heilongjiang University of Science & Technology*. – 2023. – Vol. 33, № 6. – P.779-783. DOI: 10.3969/j.issn.2095-7262.2023.06.001.

6. Люй, Л. Исследование усталостных характеристик сплава 7075 до и после нанесения на него МДО покрытия / Л. Люй // *Молодежь и наука: актуальные проблемы фундамен-*

тальных и прикладных исследований: Материалы VII Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 08–12 апреля 2024 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2024. – С. 55-57.

7. Formation of oxide coatings on aluminum alloy 7075 by micro-arc oxidation / O. V. Bashkov, L. Lyu, Z. Zhao, T. I. Bashkova // International Symposium Materials and Technologies: Materials of the International Russian-Chinese Symposium, Khabarovsk, 24–26 сентября 2024 года. – Khabarovsk: Pacific National University, 2024. – P. 50-54.

8. Люй, Л. Исследование динамики развития усталостных трещин при циклическом изгибе / Л. Люй, Ф. Сяо, Т. И. Башкова, О. В. Башков // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: Материалы V Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 11–15 апреля 2022 года. Том Часть 2. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. – С. 122-124.

9. Люй, Л. Исследование свойств и характеристик оксидных покрытий, сформированных в процессе микродугового оксидирования в электролите на основе гексаметафосфата натрия / Л. Люй, Ц. Чжао, О.В. Башков, С. Ли // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению: Материалы Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 16–17 ноября 2023 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2023. – С. 38-41.

10. Люй, Л. Исследование оксидных покрытий, сформированных в процессе микродугового оксидирования в электролите на основе гексаметафосфата натрия / Л. Люй, Ц. Чжао, О. В. Башков, С. Ли // Новые материалы и технологии в условиях Арктики : Материалы VI Международной конференции с элементами научной школы для молодежи, посвященной 30-летию высшего химического образования в Республике Саха (Якутия), Якутск, 27–29 ноября 2023 года. – Якутск: Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, 2023. – С. 126-128.

11. Люй, Л. Исследование свойств и характеристик оксидных покрытий, сформированных в процессе микродугового оксидирования в электролите на основе гексаметафосфата натрия / Л. Люй, Ц. Чжао, О. В. Башков, С. Ли // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению: Материалы Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 16–17 ноября 2023 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2023. – С. 38-41.

12. Акустическая эмиссия в процессе формирования оксидного покрытия на алюминиевом сплаве Д16АТ / Ф. Бао, Т. И. Башкова, Л. Люй, О. В. Башков // Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии: Тезисы докладов Международной конференции, Томск, 11–14 сентября 2023 года. – Томск: Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, 2023. – С. 384-385.

13. Акустическая эмиссия в процессе зарождения и распространения усталостных трещин в алюминиевом сплаве 1163 с МДО-покрытием / Ф. Бао, Т. И. Башкова, Л. Люй // Физическая мезомеханика материалов. Физические принципы формирования многоуровневой структуры и механизмы нелинейного поведения: Тезисы докладов Международной конференции, Томск, 05–08 сентября 2022 года. – Новосибирск: Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 2022. – С. 101-102. – DOI 10.25205/978-5-4437-1353-3-57.

14. Влияние различных электролитов на толщину и шероховатость покрытия, формируемого при микродуговом оксидировании алюминиевого сплава В95 / Ц. Чжао, С. Цзян, Л. Люй [и др.] // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных

исследований : Материалы VII Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 08–12 апреля 2024 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2024. – С. 123-126.

15. Влияние индуктивности при микродуговом оксидировании на толщину покрытия и морфологию поверхности алюминиевого сплава / С. Цзян, Л. Люй, Ц. Чжао, А.А. Бурдасова, О.В. Башков // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: Материалы Всероссийской национальной научной конференции молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 8–12 апреля 2024 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2024. – С. 15-17.

*Объекты интеллектуальной собственности*

16. Пат. RU 2807242 С1 Российская федерация. Способ мониторинга и управления процессом микродугового оксидирования с использованием метода акустической эмиссии / О.В. Башков, Ф. Бао, Т.И. Башкова, Л. Люй, Г. Башков. – Заявка № 2023104089 от 21.02.2023, опубл. 13.11.2023, Бюл. №32 – 10 с.