



«УТВЕРЖДАЮ»  
Зам. директора по НР  
ФГБУН Институт физики прочности  
и материаловедения СО РАН  
доктор технических наук, профессор

С. П. Буякова

2 июня 2023 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук на диссертационную работу Бао Фэнюань «Формирование оксидных покрытий на алюминиевых сплавах микродуговым оксидированием и особенности их разрушения», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. – «Материаловедение»

Рассмотрев и обсудив диссертационную работу Бао Фэнюань «Формирование оксидных покрытий на алюминиевых сплавах микродуговым оксидированием и особенности их разрушения», отмечаем следующее.

**Актуальность темы диссертационной работы.** Использование микродугового оксидирования позволяет создавать защитное покрытие на поверхности алюминиевых деталей, которое обеспечивает надежную защиту от воздействия внешних факторов, таких как агрессивные среды, коррозия, трение и износ. Однако, важно отметить, что наличие покрытия также может влиять на механическое поведение и прочностные характеристики конструкций и изделий, выполненных из алюминиевых сплавов. Это означает, что необходимо проводить исследования, чтобы понять, как влияет покрытие на поведение и разрушение алюминиевых деталей. Таким образом, изучение влияния микродугового оксидирования на механические свойства и поведение алюминиевых сплавов является актуальной задачей. Понимание этих взаимосвязей позволит разработать более эффективные методы и технологии обработки, а также повысить надежность и долговечность алюминиевых компонентов, используемых в сложных рабочих условиях.

Поэтому диссертационная работа Бао Фэнюань, посвященная разработке методики управления качеством оксидных покрытий, формируемых на поверхности образцов и изделий из алюминиевых сплавов в процессе МДО, и выявлению кинетики накопления поврежденности алюминиевых сплавов с МДО покрытием, является актуальной.

**Содержание диссертационной работы.** Диссертационная работа изложена на 144 страницах, состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, содержащего 130 литературных источников, двух приложений и содержит 13 таблиц и 68 рисунков.

**Во введении** подробно обосновывается актуальность научных исследований, представляющих значимость и важность их практического применения. Приведена цель и определены задачи, которые преследуются при выполнении данной работы. Особое внимание уделяется научной новизне представленных исследований, подчеркивая их

оригинальность и вклад в область знания, занимающуюся изучением взаимосвязи структуры и свойств материалов. Кроме того, показаны практическая и теоретическая значимость полученных результатов, их потенциальное применение и влияние на современную науку и технологии. Во введении также приведена апробация полученных результатов, т. е. процесс проверки и подтверждения их достоверности и применимости через эксперименты, испытания или другие методы. В целом, введение предоставляет четкую основу и обоснование для дальнейшего изложения результатов исследования.

**В первой главе** представлен обзор технического контекста, связанного с исследованием функциональных покрытий. Рассмотрено текущее состояние исследований, выполненных в области изучения технологии микродугового оксидирования, методов нанесения оксидных покрытий. Были освещены различные методы формирования покрытий, включая химическое оксидирование, электрохимическое оксидирование и микродуговое оксидирование алюминия и его сплавов. Далее рассмотрены вопросы теории разрушения и роста трещин в алюминиевых сплавах, исследованы механизмы, стадии и кинетика роста трещин, что является важным аспектом для понимания поведения материала при разрушении. Также была представлена технология метода акустической эмиссии и описаны основные принципы его применения для обнаружения развивающихся дефектов и повреждений в материалах с упрочняющими покрытиями. На основе проведенного анализа были сформулированы цель и основные задачи исследования. Определение цели и задач является важным шагом для достижения конкретных результатов и получения ответов на научные вопросы, связанные с исследуемой темой.

**Во второй главе** описаны материалы, представлен разработанный план исследований и предложена методика мониторинга и управления качеством полученных оксидных покрытий на основе анализа сигналов акустической эмиссии, регистрируемой в процессе выполнения микродугового оксидирования. Представлены методы формирования покрытий, включая настройку параметров, режимов источника питания и подбор состава электролита. Описаны методы исследования морфологии и качества покрытий, включая оптическую и сканирующую электронную микроскопии, а также измерение шероховатости и толщины. Представлены методики механических испытаний на растяжение и усталость в сопровождении метода акустической эмиссии. Описаны методы предобработки сигналов и проведения экспериментов для определения зависимости качества покрытия от параметров режимов и сигналов акустической эмиссии. Таким образом, данное исследование основано на использовании современных физико-химических методов и высокоточного научного оборудования, что гарантирует достоверность полученных результатов.

**В третьей главе** исследовано влияние режимов оксидирования на параметры оксидных покрытий, полученных методом микродугового оксидирования (МДО). В данной главе рассмотрены следующие аспекты: модель электрического пробоя и механизм образования оксидного слоя на алюминиевом сплаве при МДО; исследование влияния скорости нарастания напряжения на морфологию и свойства оксидного покрытия на алюминиевом сплаве; исследование влияния концентрации  $\text{Na}_3\text{PO}_4$  в электролите на механизм формирования и рост оксидного покрытия; установление зависимости качества оксидного покрытия от параметров МДО. Результаты показали, что уменьшение скорости роста напряжения на первой стадии окисления приводит к уменьшению максимальной

плотности тока и напряжения в период пассивации, связанной с концентрационной поляризацией. На втором этапе формирования МДО-покрытия происходит образование микровзрывов в уже формирующихся каналах пробоя, приводящее к образованию неравномерного рельефа поверхности. Предложена методика установления зависимости параметров оксидного покрытия на алюминиевом сплаве от режимов МДО с использованием методики факторного анализа и решения уравнений линейной регрессии.

**Четвертая глава** посвящена разработке подхода к управлению качеством формируемого на алюминиевых сплавах оксидных покрытий с помощью разработанной методики контроля процесса микродугового оксидирования с применением метода акустической эмиссии. Результаты исследования показали, что достоверность линейной аппроксимации между экспериментальными и расчетными значениями параметров покрытий может быть повышена путем использования периода времени до окончания оксидирования, определенного по минимальному или максимальному значению амплитуды сигналов акустической эмиссии. Дополнительное использование периода времени до завершения процесса оксидирования, определенного по максимальному значению на втором цикле изменения амплитуды сигналов акустической эмиссии, дополнительно повышает достоверность расчетных значений. Введение третьего контролируемого фактора позволяет применить данную методику в онлайн-мониторинге процесса МДО с целью достоверного получения заданных значений параметров покрытия.

**В пятой главе** исследуется влияние структурной неоднородности и пористости оксидных покрытий, полученных методом микродугового оксидирования, на их механические свойства и поведение при деформации. Наличие покрытия существенно влияет на механизм трещинообразования, усложняя оценку механического разрушения через параметры акустической эмиссии. Результаты показывают, что процесс усталостной нагрузки приводит к образованию квазипериодической сетки трещин, а период до образования основной трещины зависит от шероховатости исходных трещин в оксидном покрытии. Однородное покрытие без трещин не оказывает заметного влияния на усталостную долговечность материала.

**В заключении** автор провел обобщение данных, полученных в процессе исследования, а также сформулировал основные научные результаты работы, их практическая значимость и перспективы для дальнейшей разработки темы исследования.

**В приложении** представлены два акта внедрения по результатам выполненной работы.

Текст диссертационной работы написан научным языком, изложено грамотно и логично. Автореферат диссертации и опубликованные работы в полной мере отражают содержание диссертационной работы. Рукопись диссертационной работы и автореферат оформлены в соответствии с требованиями ВАК РФ. Полученные соискателем результаты обладают научной новизной, теоретической и практической значимостью.

**Научная новизна и научная значимость работы заключается в следующем.**

1. Установлено влияние электрических режимов на морфологию и качество оксидных покрытий на алюминиевых сплавах Д16АТ и 1163. Рост толщины покрытия становится линейным после достижения определенного электрического напряжения, связывающего шероховатость и толщину покрытий.

2. Предложен критерий управления качеством оксидных покрытий на алюминиевых сплавах в процессе микродугового оксидирования, основанный на

амплитуде сигналов акустической эмиссии в период устойчивого роста покрытия.

3. Обосновано использование критерия оценки поврежденности алюминиевых сплавов с оксидным покрытием МДО на ранних стадиях усталостного разрушения, основанного на новом параметре акустической эмиссии.

**Обоснованность и достоверность полученных результатов.** Корректность постановки задачи, использование аттестованного оборудования, поверенных средств измерений и апробированных методик исследований обеспечивают достоверность и обоснованность полученных в работе экспериментальных результатов, выводов и рекомендаций. Основное содержание диссертационной работы отражены в 12-ти публикациях, из них одна публикация - в журнале, входящем в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ, три публикации - в изданиях, входящих в базы данных Web of Science или Scopus, имеется один патент на изобретение и одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Практическая значимость полученных результатов заключается в следующем.**

1. Разработка способа и методики управления качеством оксидных покрытий на алюминиевых сплавах, формируемых методом микродугового оксидирования, является одним из важных результатов. Этот подход позволяет повысить стабильность и надежность формирования покрытий, что имеет прямое применение в промышленности.

2. Предложенный критерий оценки характера поврежденности оксидного покрытия при циклических нагрузках представляет большую значимость. Он может быть использован для прогнозирования возможного разрушения изделий с оксидными покрытиями, формируемыми в процессе микродугового оксидирования. Это позволяет сократить потенциальные риски и повысить безопасность конструкций.

3. Результаты данной научной работы успешно внедрены в учебный процесс при курсовом и дипломном проектировании, а также используются при чтении курсов на кафедре "Материаловедение и технология новых материалов". Кроме того, они приняты к использованию на малом инновационном предприятии ООО "ЭСКО" при разработке критериев разрушения конструкций из алюминиевых сплавов с покрытиями. Это подтверждает практическую значимость и применимость результатов работы в реальных условиях и способствует развитию промышленности и научного образования.

**Имеются замечания по диссертационной работе.**

1. В работе не представлено четкого обоснования выбора исследуемых материалов – алюминиевых сплавов Д16АТ и 1163.

2. В работе предложены новый параметр и критерий для управления качеством формирующегося покрытия на основе использования метода акустической эмиссии для мониторинга процесса микродугового оксидирования. Однако не приведено сравнение эффективности применения предложенной методики с существующими методами.

3. Не все ссылки на цитируемые источники оформлены должным образом, например, в ссылках 8, 13, 14, 69 не указаны издатель и объем издания.

4. Литературный обзор не является завершенным, отсутствуют ссылки на некоторые публикации авторов из Новосибирска, Томска, Москвы.

**Заключение.** Диссертационная работа Бао Фэнюань «Формирование оксидных покрытий на алюминиевых сплавах микродуговым оксидированием и особенности их разрушения» по актуальности темы исследования, научной новизне, практической

значимости и достоверности достигнутых результатов, а так же по объему выполненных исследований, уровню публикаций и личному вкладу представляет собой законченное, самостоятельно проведенное, научно-квалификационное исследование, в котором решена важная научно-практическая задача разработки методики управления качеством оксидных покрытий на алюминиевых сплавах в процессе микродугового оксидирования. Представленная работа соответствует требованиям п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней» утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 14 сентября 2013 г. № 842 (ред. От 11.09.2021), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Бао Фэньюань заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. – «Материаловедение (технические науки)».

Отзыв подготовлен доктором технических наук, старшим научным сотрудником лаборатории физики наноструктурных биокomпозитов Института физики прочности и материаловедения СО РАН Седельниковой Марией Борисовной (05.17.11 – технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов).

Диссертационная работа, автореферат и содержание отзыва обсуждены и одобрены на заседании научного семинара лаборатории физики наноструктурных биокomпозитов ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, протокол № 4/23 от 1 июня 2023 года.

Присутствовало на заседании 15 человека. Результаты голосования: «за» – 15; «против» – 0, «воздержалось» – 0

Председатель семинара, доктор технических наук,  
старший научный сотрудник лаборатории физики  
наноструктурных биокomпозитов ИФПМ СО РАН,  
доцент

Мария Борисовна Седельникова

Секретарь семинара, кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник лаборатории физики  
наноструктурных биокomпозитов ИФПМ СО РАН

Анна Юрьевна Ерошенко

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки **Институт физики прочности и материаловедения** Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН)

Адрес: 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/4

Телефон: +7 (3822) 286-941 Факс: +7 (3822) 49-25-76

E-mail: [root@ispms.tomsk.ru](mailto:root@ispms.tomsk.ru), вебсайт: <http://www.ispms.ru>