

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

на диссертационную работу Бао Фэньюань «Формирование оксидных покрытий на алюминиевых сплавах микродуговым оксидированием и особенности их разрушения», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17 – Материаловедение (технические науки)

### **Актуальность избранной темы**

Актуальность избранной темы исследований по созданию защитных покрытий на исполнительных поверхностях алюминиевых сплавов несомненна, поскольку МДО позволяет создавать прочные и стойкие оксидные покрытия, значительно повышающие их защиту и долговечность, обладают высокой твёрдостью, химической стойкостью и антикоррозионными свойствами, что особенно важно для использования их в космическом, авиационном, транспортном машиностроении, кораблестроении, приборостроении, других отраслях производства. Представленная работа по исследованию покрытий алюминиевых сплавов микродуговым оксидированием (МДО) материаловедческая, построена на современной парадигме науки о материалах, исходным звеном которой предусматривается создание материалов, отвечающих своему функциональному назначению, других составляющих звеньев парадигмы: состав, структура, свойства материалов, включая решение актуальной проблемы повреждённости исполнительных поверхностей алюминиевых сплавов 1163 и Д16АТ с микродуговым покрытием на ранних стадиях от усталостного разрушения. В основу общей формулировки функционального назначения поставлено достижение повышенных механических свойств в условиях циклических нагрузок при использовании технологии формирования МДО покрытий на поверхности с изучением механизма пластической деформации, уменьшающего рост усталостных трещин, обусловленного различием в свойствах покрытия и подложки, изучением влияния технологии на структуру, сплошность покрытия, с целью повышения физико-химических характеристик и функциональных свойств.

Работа Бао Фэньюань была направлена на установление закономерностей влияния технологических режимов МДО на параметры и свойства оксидных покрытий алюминиевых сплавов, выявление критериев повреждений на ранних стадиях разрушения при различных условиях нагружения, разработку методики управления качеством МДО покрытий, формируемых на Al сплавах и выявление кинетики накопления повреждённости с использованием метода АЭ.

### **Научная новизна и научная значимость работы**

В диссертации предложена методика, определяющая зависимость параметров оксидного покрытия на алюминиевом сплаве Д16АТ от различных режимов МДО. Методика основана на линейной регрессии, проведённой для двух факторов: времени и плотности тока оксидирования. Достоверность зависимости между экспериментальными и расчётными значениями толщины и шероховатости оксидного покрытия составила, соответственно, 0,89 и 0,74. Введение периода устойчивого роста оксидного покрытия на основе изменения амплитуды сигналов АЭ, предложенного в качестве критерия достижения заданных значений толщины и шероховатости оксидных покрытий, представляется как научно-обоснованный подход к управлению качеством оксидных покрытий, формируемых на алюминиевых сплавах в процессе МДО. Метод дополнен использованием периода времени от момента достижения максимальной амплитуды (на втором цикле изменения её значений) до завершения процесса оксидирования, что ещё больше повышает достоверность расчётных значений параметров покрытия в сравнении с экспериментальными. Предложенный метод позволяет расширить возможности его применения, включая онлайн- мониторинг процесса МДО, с целью достоверного определения значений толщины и шероховатости оксидного покрытия. Вейвлет-анализ сигналов АЭ использован для идентификации типов разрушения. Предложен новый параметр  $K_{WD}$  для характеристики сигнала по частотному признаку имеет важное значение в связи с тем, что позволяет выявлять переход от момента

зарождения микротрещин к развитию магистральной трещины в процессе накопления усталостных повреждений.

### **Практическая значимость полученных результатов**

Диссертационное исследование имеет практическую значимость в нескольких аспектах. Во-первых, разработан способ и методика управления качеством оксидных покрытий на Al сплавах, получаемых в процессе МДО. Использование предложенной методики контроля на основе регистрируемой амплитуды АЭ в процессе МДО, повышает точность определения толщины и шероховатости оксидного покрытия. Это позволяет повысить надёжность и эффективность процесса формирования покрытий. Во-вторых, предложен критерий ( $K_{WD}$ ) оценки повреждённости оксидного покрытия при циклическом нагружении, который может быть использован при прогнозировании разрушения изделий с такими покрытиями. Это обеспечивает возможность более точного контроля и предсказания долговечности конструкций с оксидными покрытиями. В-третьих, результаты исследования были интегрированы в учебный процесс при проведении курсового и дипломного проектирования, а также использованы в преподавании ряда дисциплин на кафедре «Материаловедение и технология новых материалов». Кроме того, эти результаты были приняты при разработке критериев разрушения алюминиевых конструкций с покрытиями для практического применения на инновационном предприятии ООО «ЭСКО», деятельность которого связана с применением современных методов испытаний и неразрушающего контроля. Таким образом, исследование имеет практическое значение для улучшения процесса формирования покрытий, прогнозирования и контроля повреждений, имеет промышленное применение на предприятии и внедрено на практике в учебный процесс. В практическом плане ряд результатов подтверждён патентом на изобретение («Способ мониторинга и управления процессом микродугового оксидирования» пат. 2022124254 заяв. 12.09.2022) и свидетельством о регистрации программы для ЭВМ (Программа разделения сигналов акустической эмиссии и сигналов искусственной нейронной сети № 2019664877, свид. о регистр. № 2019666083).

### **Анализ содержания диссертационной работы**

Диссертационная работа изложена на 144 страницах, состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 130 использованных источников, 2 приложения, содержит 13 таблиц и 88 рисунков.

**Во введении** обосновывается актуальность научных исследований, формулируется цель и определяются задачи. Кроме того, подчеркивается научная новизна, практическая и теоретическая значимость полученных результатов, а также их апробация.

**В первой главе** рассмотрено текущее состояние покрытий и методов их нанесения, включая технологию МДО, теорию разрушения и роста трещины, и применение метода АЭ для обнаружения повреждений в материалах с упрочнёнными покрытиями. На основе этого анализа была поставлена цель работы, сформулированы основные задачи исследования, а также обоснована необходимость проведения экспериментальных исследований.

**Во второй главе** представлена комплексная методика исследования оксидных покрытий, включающая описание материалов и разработку плана исследований. Также предложена методика мониторинга процесса и управления качеством покрытия на основе анализа сигналов АЭ. Описаны методы изготовления покрытия, включая настройку параметров, режим источника питания и состав электролита. Представлены методы исследования морфологии и качества покрытия, включая оптическую и сканирующую электронную микроскопию, измерение шероховатости и толщины. Предложены методики механических испытаний, основанные на регистрации сигналов АЭ и проведении испытаний на растяжение и усталость. Описаны методы предобработки сигналов и проведения экспериментов для определения зависимости качества покрытия от параметров режимов и сигналов АЭ.

**В третьей главе** представлены результаты исследований процесса формирования МДО покрытий на Al сплавах при регулировании различных факторов, включая концентрацию компонентов электролита, скорость нарастания напряжения, плотность тока окси-

дирования и время обработки. Исследование состояло из двух частей: описание процесса МДО с использованием теоретической модели газозлектрического пробоя и математической модели эквивалентной цепи для МДО, а также анализ влияния режимов на механизм образования покрытия и зависимость его качества от заданных параметров МДО.

**В четвертой главе** представлено использование метода АЭ для контроля свойств оксидных покрытий в процессе их формирования при МДО. Результаты показали, что связь между плотностью тока, временем оксидирования и характеристиками сигналов АЭ позволяет определить толщину и шероховатость покрытия, а введение дополнительного фактора – время достижения определённой стадии оксидирования – повышает точность определения значений измеряемых параметров качества покрытий и позволяет применять методику в онлайн-мониторинге процесса МДО.

**В пятой главе** рассматривается влияние структурной неоднородности и пористости оксидных покрытий, полученных методом МДО, на механические свойства и поведение материалов при деформации. Наличие покрытия существенно влияет на механизм трещинообразования, усложняя оценку механического разрушения с помощью параметров АЭ. Результаты показали, что начальный процесс циклического нагружения вызывает образование квазипериодической сетки трещин, и период до образования магистральной трещины зависит от шероховатости и поверхностных дефектов в оксидном покрытии, а равномерное покрытие без трещин не оказывает заметного влияния на усталостную долговечность материала.

**В заключении** приведены выводы по результатам диссертационного исследования.

### **Обоснованность и достоверность полученных результатов**

Достоверность и обоснованность экспериментальных результатов, выводов и рекомендаций в работе обеспечивается несколькими факторами. Во-первых, корректностью постановки задач и обоснованным выбором материалов, опирающихся на приведённый обзор МДО, отмеченный вкладом предыдущих исследователей (в обзоре можно было отметить роль члена-корреспондента РАН Геннадия Александровича Маркова, под руководством которого в 1969 г. в ИНХ СО РАН был разработан метод МДО, в 2024 г. Г.А. Маркову 80 лет, а в 2025 его МДО 55 лет); а также чётким определением целей и задач. Во-вторых, использованием современного аттестованного оборудования, соответствующего стандартам и требованиям и обеспечивающего требуемую точность и надёжность измерений; зарекомендовавших себя теоретических зависимостей в области материаловедения и технических наук, современных методов исследования (оптическая, электронная микроскопия, методы механических испытаний, метод АЭ, методы анализа экспериментальных данных, математические методы). В-третьих, использованием апробированных методик экспериментальных исследований, в своей основе обладающих логической последовательностью и непрерывностью суждений, применяемых другими исследователями, что гарантирует правильность проведения экспериментов и достоверные результаты. А также согласованностью полученных результатов с опубликованными данными других исследователей, достаточным объёмом экспериментальных данных. Достоверность работы также подтверждается 4-мя публикациями в рейтинговых журналах с квартилем Q 2-4 и участием в пяти тематических конференциях. Кроме того, работа связана с крупными научными программами и темами, выполнена при финансовой поддержке грантов: 1) Грант Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ РФ, НШ № 452.2022.4 и 2) Heilongjiang Provincial Key Research and Development Program Guidance, проект № G2022011006.

### **6. Замечания по диссертации**

По диссертации есть несколько замечаний:

1. Не сформулирована чётко научная гипотеза, хотя в работе есть доказанные научные предположения, например: ключевой причиной, определяющей изменение механических свойств Al сплавов с МДО в условиях циклических нагрузок, является механизм пластической деформации и роста усталостных трещин на поверхности при различии свойств по-

крытия и подложки, или научное предположение о возможном прогнозировании начала усталостного разрушения Al сплавов с МДО в условиях циклических нагрузок на основе критерия ( $K_{WD}$ ) сигналов АЭ, позволяющего выявить момент начального развития магистральной трещины и другие доказанные предположения.

2. Нет методологической схемы работы (хотя работа достаточно структурирована, но обобщающая методологическая схема могла бы её украсить).

3. Из главы 2, содержащей описание материалов и методов исследования, не совсем ясно, чем обоснован выбор в числе материалов, используемых при выполнении исследования, деформируемых сплавов Д16АТ и 1163.

4. В работе предложены два новых параметра, один из которых связан с особенностями формирования оксидных покрытий и позволяет повысить достоверность определения момента окончания процесса оксидирования при достижении значений заданных параметров качества покрытий. Второй параметр предложен, как параметр АЭ, позволяющий разделить механизмы разрушения на разных стадиях усталости. Почему не были использованы уже известные параметры и критерии их использования для достижения поставленной цели?

5. По оформлению. Не указан объём диссертации (144 страницы, 88 рисунков, 13 таблиц, 130 источников литературы). Под одним и тем же номером обозначены разные рисунки, например: 2.4 (с.49 и с. 51); 4.2 (с. 93 и с. 95); 4.3 (с. 94 и с. 97). Ссылки на некоторые рисунки приведены не до, а после размещения: 2.6; 3.8; 3.9; 3.13; 4.5. Одни и те же литературные источники обозначены дважды под разными номерами, например: п. 29 и 47; п. 34 и 42; п. 40 и 49; п. 46 и 87; п. 91 и 125. Некоторые литературные источники пронумерованы произвольно, не по упоминанию в тексте, например: 108-110-109; 113-119-120; 40-114-115-41; 123-130-124. Нумерация выводов в 1 гл. начинается с 4-го (нет номеров 1,2,3).

Отмеченные выше недостатки ни в коей мере не оказывают какого-либо значимого влияния на сформулированные в заключении выводы и не снижают в целом научной и практической ценности работы.

### **Соответствие содержания работы указанной специальности**

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки), пунктам № 1, 5, 11:

п. 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);

п. 5 – Установление закономерностей и критериев оценки разрушения материалов от действия механических нагрузок и внешней среды;

п. 11 – Разработка покрытий различного назначения (упрочняющих, износостойких и других) и методов управления их качеством.

### **Публикации по работе**

Основное содержание диссертации опубликовано в 12 работах, одна из которых опубликована в научном журнале, входящем в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ для публикации результатов научных исследований по научной специальности 2.6.17. – Материаловедение, 3 статьи опубликованы в рецензируемых изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science или Scopus. Кроме того, получены 1 патент на изобретение и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

### Заключение

Таким образом, по своей актуальности, уровню решённых задач, научной новизне, теоретической и практической значимости, обоснованности научных положений и выводов, достоверности полученных результатов, уровню апробации и опубликованию основных положений в печати диссертационная работа Бао Фэнюань «Формирование оксидных покрытий на алюминиевых сплавах микродуговым оксидированием и особенности их разрушения» представляет собой законченную научно-квалификационную работу по уровню и содержанию, соответствующую требованиям п. 9-14 «Положения о присуждении учёных степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата технических наук. Работа содержит новые знания и научно обоснованные технические решения, внедрение которых внесёт вклад в развитие науки и производства в сфере материалов машиностроительного и другого назначения, а её автор Бао Фэнюань заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. – Материаловедение (технические науки).

*Согласен на включение в аттестационное дело и дальнейшую обработку моих персональных данных, необходимых для процедуры защиты диссертации, в том числе размещение их в сети Интернет.*

Официальный оппонент: старший научный сотрудник Института Материаловедения Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИМ ДВО РАН) – обособленного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук (ХФИЦ ДВО РАН), кандидат технических наук (специальность 05.02.01 Материаловедение (машиностроение))


✓ ← Коневцов Леонид Алексеевич

Институт Материаловедения Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИМ ДВО РАН) – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук (ХФИЦ ДВО РАН)

Адрес: 680042, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 153,  
Телефон: +7(4212) 22-69-56. E-mail: secretar@im.febras.net

« 26 » мая 2023 г.

Подпись Л.А. Коневцова заверяю \_\_\_\_\_

  
дрово-правового отдела  
ОРАН  
Д.ЛОКТОШИНА