

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

на диссертационную работу *Бао Фэнъюань* «**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.

### **Актуальность темы диссертации**

Алюминий и его сплавы имеют ценные технологические и эксплуатационные свойства (низкая плотность, высокая теплопроводность и электропроводность). Их широкое применение в авиастроении, машиностроении и других отраслях требует защиты и модификации поверхности для улучшения ресурса и срока службы. Одним перспективным решением является нанесение оксидных керамических покрытий на алюминий и его сплавы методом микродугового оксидирования (МДО). Однако, применение МДО ограничено отсутствием систематизированной связи между свойствами покрытий и параметрами оксидирования. Выбор режима МДО для различных геометрических конфигураций изделий из разных материалов является проблемой. Необходимо линеаризовать зависимость свойств покрытий от параметров МДО. Кроме того, выявление кинетики накопления поврежденности и разрушения алюминия и его сплавов с МДО покрытием под различным видом нагружения также является перспективной задачей, обеспечивая теоретическую основу для безопасного применения деталей с МДО покрытиями в промышленности.

### **Структура и содержание диссертации**

Диссертационная работа изложена на 144 страницах, содержит 68 рисунков, 13 таблиц и состоит из введения, 5 глав, заключения, списка использованной литературы из 130 наименований.

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

**В первой главе** рассмотрены современное состояние покрытий и их нанесения, включая технологию микродугового оксидирования и применение АЭ для регистрации повреждений в материалах с упрочнёнными покрытиями. Основываясь на этом анализе, поставлена цель работы, сформулированы основные задачи исследования, а также необходимость проведения экспериментальных исследований. Отмечается отсутствие систематизированных данных, необходимых для установления связи между режимами МДО и параметрами, а также морфологией оксидных покрытий.

**Во второй главе** представлена комплексная методика исследования оксидных покрытий, включающая описание материалов, их предварительную обработку и разработку плана исследований. Также предложена методика мониторинга процесса и управления качеством оксидного покрытия на основе анализа параметров сигналов акустической эмиссии, получаемых в процессе оксидирования. Описаны методы и средства изготовления оксидного покрытия, включающие настройку электрических параметров, режим источника питания и состав электролита. Также представлены методы исследования морфологии и определения качества оксидного покрытия, включающие оптическую и сканирующую электронную микроскопию, а также измерение шероховатости и толщины покрытия. Предложены методики лабораторных механических испытаний материалов, основанные на регистрации сигналов АЭ и проведении испытаний на растяжение и усталость. Также описаны методы предобработки сигналов АЭ и проведения многофакторных экспериментов для определения зависимости качества оксидного покрытия от параметров режимов МДО и сигналов АЭ. Стратегия анализа сигналов АЭ, предложенная в данной главе, также была применена другими исследователями и практиками при изучении металлических материалов без покрытия. В данном исследовании было предложено использовать эти методики для изучения кинетики накопления повреждений при деформации и разрушении

алюминиевого сплава с оксидным покрытием.

**В третьей главе** представлены результаты исследований, направленных на изучение влияния режимов оксидирования на характер микродугового оксидирования (МДО), параметры и качество формируемых оксидных покрытий на алюминиевых сплавах. В ходе экспериментов были проведены регулирование различных факторов МДО, включая концентрацию компонентов в электролите, скорость нарастания напряжения в начальный период оксидирования, плотность тока оксидирования и время обработки. Исследования состояли из двух частей. Первая часть была посвящена описанию процесса МДО с использованием теоретической модели газозлектрического пробоя, а также концепции математической модели эквивалентной цепи для микродугового оксидирования. Вторая серия предварительных исследований включала анализ влияния режимов МДО на механизм образования оксидного покрытия и установление зависимостей между качеством формируемых покрытий и заданными параметрами МДО.

**В четвертой главе** представлено исследование, направленное на поиск сопутствующего параметра, комбинированного с факторами обработки, для контроля свойств оксидных покрытий в реальном времени. Используя метод акустической эмиссии и регистрацию сигналов, проведено исследование кинетики роста оксидных покрытий на начальной стадии процесса. Результаты показали связь между плотностью тока, временем оксидирования и характеристиками сигналов АЭ, что позволяет определить толщину и шероховатость покрытия. Для повышения точности определения параметров был введен дополнительный фактор - время достижения определенной стадии оксидирования. Предложенный подход позволяет улучшить аппроксимацию и применить методику в онлайн-мониторинге процесса МДО.

**В пятой главе** представлены результаты о влиянии структурной неоднородности и пористости оксидных покрытий, формируемых методом микродугового оксидирования, на механические свойства и поведение материалов при деформации. Наличие твердого покрытия напрямую влияет на механизм зарождения и развития трещин, что создает сложности при оценке механического разрушения материалов с такими покрытиями с помощью параметров акустической эмиссии и существующих критериев оценки. В результате исследования было установлено, что начальный процесс усталостной нагрузки, вызванный несовместимостью упругой деформации покрытия и матрицы, приводит к образованию квазипериодической сетки трещин. При одинаковых условиях испытаний, период до образования главной трещины в образце без покрытия составил 0,87Nc, а при наличии высокой шероховатости и исходных трещин в оксидном покрытии, полученном при высокой плотности тока, период до образования главной трещины увеличился до 0,93Nc. В случае равномерного оксидного покрытия без исходных трещин на поверхности не было заметного влияния на усталостную долговечность алюминиевого сплава, и период до образования главной трещины составил 0,88Nc, что соответствует значению для образца без покрытия.

#### **Достоверность и обоснованность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации**

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректным использованием методов экспериментальных исследований с применением современного технологического и аналитического оборудования, методов планирования эксперимента, статистической обработкой экспериментальных данных, использованием стандартных компьютерных программ. Основные результаты работы основываются на количественном анализе электрических параметров и сигналов АЭ, зарегистрированных в процессе МДО, анализе параметров исследуемых формируемых МДО покрытий, анализе кинетики повреждения с помощью микроструктуры и характера сигналов АЭ. Полученные данные интерпретируются, исходя из известных положений материаловедения, металлофизики, электрохимия, мезомеханики, физики прочности и пластичности. вывод убедительны и

последовательно вытекают из экспериментальных исследований.

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

Научная новизна и положения, выносимы автором на защиту не вызывают сомнений, они подтверждены экспериментальными результатами, полученными с привлечением современных, хорошо отработанных методов исследований и современного высокоточного исследовательского оборудования. Представленное исследование имеет важное значение для понимания влияния электрических режимов микродугового оксидирования на формирование оксидных покрытий на алюминиевых сплавах. Автор предложил новый критерий управления качеством оксидных покрытий, основанный на периоде устойчивого роста покрытия, определяемого изменениями амплитуды сигналов акустической эмиссии. Кроме того, использование предложенного критерия позволяет оценки и прогнозирования поврежденности алюминиевых сплавов с оксидным покрытием на ранних стадиях усталостного разрушения. Полученные результаты расширяют возможность для управления качеством формирования МДО покрытия и повышают эксплуатационную безопасность алюминиевого сплав с покрытием.

Важно также отметить

### **Замечания и вопросы по диссертации**

По диссертации имеются несколько замечаний и вопросов:

1. В первой главе, посвященной обзору литературы, на в таблице на с. 21, содержащей краткую историческую справку об истории развития технологии МДО, не содержится информации о вкладе Российских ученых Института химии ДВО РАН, равно как и ссылок на литературные источники, содержащие материалы работ выполненных учеными Института химии ДВО РАН.

2. Выполненные диссертантом исследования включали только такие параметры качества поверхности и поверхностного оксидного слоя, сформированного в процессе микродугового оксидирования, как толщина слоя и шероховатость. Не приведены результаты исследований, например, твердости и пористости покрытий, также не приведены результаты анализа химического состава покрытия, сформированного при МДО.

3. В разделе, посвященном измерению механических свойств, представлены результаты испытаний с образцами, различающимися лишь по двум значениям исследованных в работе параметров качества. В связи с этим затруднительно судить о линейной связи значений полученных характеристик усталости с полученными значениями исследуемых параметров качества оксидных покрытий.

4. В представленных результатах исследования механизмов разрушения покрытий, сформированных при МДО, и используемых при прогнозировании долговечности алюминиевых сплавов не были использованы существующие критерии, а была предпринята попытка разработки новых параметров. В чем причина такого выбора и необходимость разработки новых критериев?

### **Публикации по работе**

Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 12 публикациях. Из них 4 статьи опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикации материалов диссертаций, или приравненных к ним научных изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus, один патент на изобретение и одно свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ.

По своей актуальности, уровню решенных 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 соответствует требованиям пп. 9-14 положения ВАК РФ, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г., предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор Бао Фэнюань заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. – Материаловедение (технические науки).

Официальный оппонент:

доктор технических наук,  
специальность 02.00.05 - электрохимия,  
профессор по специальности 02.00.04 - физическая химия,  
Заслуженный деятель науки РФ

Гордиенко Павел Сергеевич



Согласен на обработку своих персональных данных  
Заведующий лабораторией защитных покрытий и морской коррозии.  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт  
химии Дальневосточного отделения Российской академии наук.

Почтовый адрес организации:

Приморский край, 690022, г. Владивосток, Проспект 100-летия  
Владивостока, д. 159.

Телефон: 8-914-703-77-89, e-mail: pavel.gordienko@mail.ru

Подпись Гордиенко Павла Сергеевича заверяю

НАЧАЛЬНИК  
ИНСТИТУТА

