

УТВЕРЖДАЮ:

Первый проректор по науке  
ФГБОУ ВО «Уфимский  
государственный авиационный  
технический университет»

д.т.н., профессор

Еникеев Рустэм Далилович

«25» сентября 2021 г.

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Вялого Игоря Евгеньевича «Гидрофобные покрытия на сплавах алюминия и магния, формируемые с использованием плазменного электролитического оксидирования», представленную на соискание ученой степени кандидата химических наук по специальности 1.4.4. - Физическая химия

### Актуальность темы исследования

Алюминиевые и магниевые сплавы – одни из наиболее востребованных конструкционных материалов в различных областях промышленности, таких как автомобильная, аэрокосмическая, электронная и др. благодаря их низкому удельному весу и высокой прочности. Однако два существенных недостатка этих материалов, а именно низкое сопротивление коррозии и износу, ограничивают область их практического использования. В этой связи, одной из наиболее важных и приоритетных задач является повышение эффективности уже существующих и создание новых методов защиты от коррозии этих металлов и их сплавов. Одним из способов, позволяющих значительно повысить механические и коррозионные характеристики обрабатываемых изделий, является создание поверхностного слоя с использованием метода плазменного электролитического оксидирования (ПЭО). ПЭО-покрытия обладают не только хорошими антикоррозионными и механическими свойствами, но и развитой поверхностью, что позволяет использовать их как

основу для создания композиционных слоев с применением различных, в том числе наноразмерных, материалов. Анализ литературных данных свидетельствует о том, что изменением гидрофобных свойств можно существенным образом влиять на коррозионные характеристики защищаемых металлов. Формирование гидрофобных и супергидрофобных покрытий, изучение их электрохимического поведения представляют собой важные этапы создания противокоррозионной защиты металлов и сплавов, эффективной не только в атмосферных условиях, но и в агрессивной среде. Таким образом, разработка перспективных способов формирования гидрофобных и супергидрофобных покрытий, обладающих высокими антикоррозионными свойствами, с целью защиты алюминиевых и магниевых сплавов от разрушающих факторов при их эксплуатации, является актуальной и важной задачей для реального сектора экономики России.

### **Оценка структуры и содержания работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Диссертационная работа изложена на 149 страницах машинописного текста, содержит 16 таблиц, 59 рисунков. Список литературы включает 202 наименования.

**Во введении** приведена актуальность темы диссертации, сформулирована ее цель и отражены задачи исследования, указана степень разработанности темы диссертационной работы. Изложены научная новизна, практическая и теоретическая значимость диссертации, представлены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлен обзор литературных данных о способах создания гидрофобных и супергидрофобных покрытий на алюминиевых и магниевых сплавах, значительно увеличивающих их антикоррозионные и механические свойства. Также представлен литературный анализ использования при формировании поляризирующего сигнала с различными коэффициентами заполнения и частоты, что позволяет регулировать пористость и шероховатость поверхностных слоев, распределение химических соединений,

входящих в состав покрытия, по его толщине, механические и антикоррозионные свойства покрытий на алюминиевых и магниевых сплавах.

В конце главы сделан вывод о том, что, несмотря на многообразие способов формирования гидрофобных и супергидрофобных покрытий на магниевых и алюминиевых сплавах, данные подходы и методы не обеспечивают стабильность гидрофобных свойств, а также не имеют требуемого уровня защиты от коррозии и механического износа. На сегодняшний момент остается не изученным вопрос о влиянии коэффициента заполнения при длительности импульсов менее 10 мкс на формирование и антикоррозионные, механические и гидрофобные свойства ПЭО-покрытий.

В связи с вышеизложенным представляется целесообразным исследование механизма формирования защитных гидрофобных и супергидрофобных покрытий с использованием метода плазменного электролитического оксидирования на сплавах магния и алюминия, что позволит значительно увеличить антикоррозионные и механические свойства обрабатываемых материалов.

**Во второй главе** представлено подробное описание используемых в диссертации объектов исследования, лабораторного оборудования и методов для их изучения, в частности способов формирования гидрофобных и супергидрофобных композиционных покрытий на базе ПЭО-слоев, предварительно полученных на алюминиевом сплаве АМгЗ и магниевом сплаве МА8.

**В третьей главе** представлены результаты проведенных комплексных исследований свойств гидрофобных и супергидрофобных покрытий, сформированных на поверхностных слоях, полученных оксидированием алюминиевого и магниевого сплавов с последующей их гидрофобизирующей обработкой. Автором представлена последовательность основных стадий подготовки образцов для создания гидрофобных и супергидрофобных покрытий. Разработанные способы формирования защитных слоёв позволили добиться реализации гетерогенного режима смачивания, обусловленного



многоуровневым рельефом поверхности модифицированного наночастицами диоксида кремния ПЭО-слоя и низкой поверхностной энергии гидрофобного агента. Созданные поверхностные слои подвергались комплексному анализу следующими методами: сканирующей электронной микроскопией, энергодисперсионным и рентгенофазовым анализом, потенциодинамической поляризацией и электрохимической импедансной спектроскопией. На основе полученных результатов были установлены причины, обуславливающие высокие антикоррозионные свойства и стабильность формируемых композиционных покрытий, а именно уменьшение площади контакта материала покрытия с агрессивной хлоридсодержащей средой, высокие барьерные свойства базовых ПЭО-покрытий, а также химическая связь молекул гидрофобного агента с покрытием.

**В четвертой главе** исследуется влияние коэффициента заполнения поляризующего сигнала с длительностью импульсов 5 мкс на формирование и свойства ПЭО-покрытий на сплаве алюминия АМгЗ. Автором установлен оптимальный состав используемой электролитической системы, обеспечивающей формирование ПЭО-покрытий со значительно большей микротвердостью, по сравнению с алюминиевой подложкой. Также исследовано влияние применяемых режимов оксидирования на морфологию, пористость, толщину и смачиваемость ПЭО-покрытий. На основе полученных результатов сделан вывод о том, что увеличение в исследуемом диапазоне коэффициента заполнения ведет к значительному снижению пористости и увеличению антикоррозионных свойств ПЭО-слоев. Применение короткоимпульсного поляризующего сигнала обеспечивает в более широком диапазоне управление рельефом поверхности и химическим составом, что способствует значительному улучшению гидрофобных свойств ПЭО-покрытий.

### **Новизна полученных результатов**

Научная новизна диссертационной работы заключается в разработке способов формирования антикоррозионных гидрофобных и супергидрофобных композиционных покрытий на поверхности алюминиевых и магниевых

сплавов, включающие в себя ПЭО-обработку с последующей модификацией гидрофобным материалом. Впервые отработаны условия подготовки ПЭО-слоев на алюминиевых и магниевых сплавах для последующей модификации покрытий гидрофобным агентом и исследованы морфология, электрохимические свойства, смачиваемость формируемых композиционных покрытий. Изучено влияние формы и частоты поляризующего сигнала, используемого при плазменном электролитическом оксидировании, на свойства получаемых покрытий на сплаве алюминия АМгЗ в электролитах, содержащих органические ( $C_4H_4O_6K_2 \cdot 0,5H_2O$ ) и неорганические ( $NaF$ ,  $Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$ ,  $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$ ,  $Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$ ) компоненты. Установлена взаимосвязь между значением коэффициента заполнения поляризующего сигнала, используемого при плазменном электролитическом формировании покрытий на сплаве алюминия АМгЗ, и электрохимическими, гидрофобными и механическими свойствами получаемых слоев.

#### **Степень достоверности результатов исследования**

Достоверность результатов работы обеспечена применением аттестованных измерительных приборов и апробированных методик, использованием взаимодополняющих методов исследования, соблюдением принципа комплексного подхода при анализе и интерпретации экспериментальных данных, воспроизводимостью результатов, применением статистических методов оценки погрешностей при обработке экспериментальных данных.

#### **Теоретическая и практическая значимость результатов, полученных автором диссертации**

Полученные в ходе выполнения диссертационной работы научные результаты расширяют теоретические представления о возможностях формирования защитных антикоррозионных ГФ и СГФ покрытий на поверхности металлов и сплавов.

Разработаны и оптимизированы режимы создания базового ПЭО-слоя для последующей модификации гидрофобным агентом, практически значимые

способы формирования на основе ПЭО-слоя композиционных ГФ и СГФ покрытий на магниевых и алюминиевых сплавах, существенным образом (до 7 порядков величины) снижающие плотность тока коррозии в хлоридсодержащей среде.

Формируемые ПЭО-покрытия перспективны для промышленного использования и могут расширить область применения алюминиевых и магниевых сплавов в аэрокосмической, автомобильной и других отраслях промышленности за счет значительного увеличения степени защиты изделий от коррозии, путем повышения гидрофобности и создания приемлемых для практики механических свойств поверхностных слоев.

Разработан способ формирования ПЭО-покрытий в биполярном режиме при длительности поляризующего сигнала 5 мкс, обеспечивающий необходимое для промышленного использования улучшение коррозионных и механических свойства ПЭО-покрытий.

### **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Представленные в работе перспективные способы формирования на поверхности алюминиевых и магниевых сплавов ГФ и СГФ покрытий, обладающих высокими антикоррозионными свойствами, позволят значительно расширить область практического использования этих материалов в аэрокосмической, автомобильной и других отраслях промышленности за счет значительного увеличения степени защиты изделий от коррозии путем повышения гидрофобности и улучшения механических свойств поверхностных слоев.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. На рисунке 3.5. не представлена морфология поверхности предварительно подвергнутого кипячению ПЭО-покрытия, что не позволяет комплексно анализировать происходящие с микротрубками изменения, а также не дает полного представления о структуре полученного слоя гидроксида алюминия. При этом данная информация была бы полезной с точки зрения



понимания механизма улучшения электрохимических свойств и смачиваемости у ПЭО-покрытия после обработки кипячением, что позволило бы в более выигрышном варианте описать полученные результаты исследования для полученных именно на их базе гидрофобных и супергидрофобных покрытий.

2. Как можно объяснить меньшие затраты электроэнергии при использовании поляризующего сигнала прямоугольной формы, в сравнении с непрямоугольной?

3. Изучение влияния коэффициента заполнения поляризующего сигнала именно при длительности импульса 5 мкс, было охарактеризовано не в полном диапазоне, а от 5 до 20 %, что требует проведения дальнейших исследований при больших его значениях.

Сделанные замечания носят рекомендательный характер и не снижают научной ценности работы.

### **Заключение по диссертационной работе**

Диссертационная работа И.Е. Вялого «Гидрофобные покрытия на сплавах алюминия и магния, формируемые с использованием плазменного электролитического оксидирования» является завершенным научным трудом, выполненном на хорошем экспериментальном уровне. Диссертация написана грамотным литературным языком, результаты исследований хорошо оформлены и проиллюстрированы.

Полученные результаты могут быть использованы специалистами, работающими в области физической химии, электрохимии, защиты материалов, и рекомендованы к использованию в организациях и научных центрах, занимающихся разработкой и внедрением методов защиты металлов и сплавов, таких как Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Московский институт стали и сплавов, Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, ЦНИИ КМ «Прометей» им. И.В. Горынина Национального исследовательского центра «Курчатовский Институт», Федеральное государственное бюджетное образовательное

учреждение высшего образования Уфимский государственный авиационный технический университет (УГАТУ).

Диссертация И.Е. Вялого отвечает требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук (п. 9 «Положение о присуждении ученых степеней») ее автор, Игорь Евгеньевич Вялый, заслуживает присуждения ученой степени кандидата химических наук по специальности 1.4.4. Физическая химия.

Отзыв на диссертацию и автореферат обсужден и одобрен на расширенном заседании кафедры технологии машиностроения - ФГБОУ ВО «УГАТУ» «14» октября 2021 г., протокол № 6.

Профессор кафедры  
двигателей внутреннего сгорания  
ФГБОУ ВО «УГАТУ»,  
доктор технических наук,  
по специальности  
05.16.08 – Нанотехнологии и  
наноматериалы (металлургия и материаловедение)  
[dudareva.nyu@ugatu.su](mailto:dudareva.nyu@ugatu.su)

25.10. 2021 г. 6

\_\_\_ Дударева Наталья Юрьевна

И.о. зав. кафедрой технологии  
машиностроения ФГБОУ ВО «УГАТУ»,  
доктор технических наук,  
по специальности 05.16.01  
«Металловедение и термическая  
обработка металлов и сплавов»  
[ramazanov.kn@ugatu.su](mailto:ramazanov.kn@ugatu.su)

25.10. 2021 г. 4

\_\_\_ Рамазанов Камиль Нуруллаевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет»  
450008. Республика Башкортостан. г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12  
+ 7 (987) 254-38-29  
[office@ugatu.su](mailto:office@ugatu.su)