

К. т. н. **М. А. Марков** (✉), **А. Д. Быкова**, к. х. н. **А. В. Красиков**,
к. т. н. **Б. В. Фармаковский**, к. т. н. **Д. А. Геращенко**

НИИЦ «Курчатовский институт» —
Центральный научно-исследовательский институт конструкционных
материалов «Прометей», Санкт-Петербург, Россия

УДК 621.7.029

ФОРМИРОВАНИЕ ИЗНОСО- И КОРРОЗИОННО-СТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ МИКРОДУГОВЫМ ОКСИДИРОВАНИЕМ АЛЮМИНИЯ

Приведены результаты экспериментальных исследований в области формирования керамических алюмооксидных покрытий методом микродугового оксидирования алюминия. Исследования выполнены в научном нанотехнологическом центре НИИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей».

Ключевые слова: микродуговое оксидирование (МДО), защитные покрытия, поверхностная обработка, упрочнение металлов, оксидная пленка, холодное газодинамическое напыление (ХГДН), износостойкий материал.

ВВЕДЕНИЕ

Технический прогресс в современном мире обуславливает необходимость существенного улучшения физико-механических свойств функциональных материалов для эффективного расширения области их применения. Наиболее сложные проблемы возникают при упрочнении поверхностей алюминиевых и стальных деталей, работающих в ответственных узлах механизмов морской и авиационной техники. Во многих случаях именно свойства поверхности определяют область использования изделия в целом, его устойчивость к механическому или химическому воздействию.

В научном нанотехнологическом центре НИИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей» сосредоточено современное технологическое оборудование, позволяющее разрабатывать уникальные защитные покрытия функционального назначения. В последние годы специалистами наноцентра проведены исследования микродугового оксидирования (МДО) алюминия, что позволило синтезировать новые перспективные керамические алюмооксидные покрытия на алюминиевых и стальных деталях, стойких к коррозии и износу. Формирование защитных керамических алюмооксидных покрытий на металле является эконо-

мически выгодной альтернативой монолитной керамике. Существующие технологические процессы изготовления керамики основаны на горячем прессовании смеси керамических порошков для получения монолитного изделия, однако этот процесс с учетом стоимости исходных материалов является дорогостоящим, особенно при изготовлении крупногабаритных изделий сложной формы.

В настоящей статье приводятся результаты комплексных исследований получения керамических алюмооксидных покрытий методом МДО алюминия.

ПРИНЦИП ФОРМИРОВАНИЯ КЕРАМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ НА АЛЮМИНИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МДО И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Принципиально новым шагом на пути создания покрытий на алюминиевых сплавах с высокими физико-механическими характеристиками стал переход от традиционного анодирования к получению оксидно-керамических покрытий в условиях искрового разряда [1, 2]. Способ МДО, фигурирующий в научной литературе как «микроразрядный синтез», «анодно-искровой электролиз», «ANOF-process» (anodische Oxidation unter Funkenentladung), «MAO» (mikro-arc-oxidation), является на сегодняшний день перспективным и прогрессивным способом упрочняющей обработки изделий из вентильных сплавов [3, 4]. МДО алюминия сочетает особенности электрохимических и микроразрядных процессов в электролитах,



М. А. Марков
E-mail: barca0688@mail.ru

являясь, по сути, более совершенной модификацией процесса анодирования [5–7]. В отличие от анодирования при МДО на поверхности алюминиевой детали образуются керамические композиционные оксидные слои, обладающие разнообразными фазовым составом, структурой и свойствами [8–18] (см. таблицу). Видно, что МДО-покрытия имеют на порядок более высокие твердость и коррозионную стойкость, чем анодированные.

Сущность МДО заключается в пропускании анодного тока большой плотности через границу раздела алюминий (вентильный металл) – электролит. На границе раздела фаз появляется напряженность, которая существенно выше ее диэлектрической плотности. Результатом становится возникновение на поверхности электрода микроплазменных разрядов с температурой от нескольких сотен до нескольких тысяч градусов Цельсия. Напряженность электрического поля в сочетании с высокой температурой разрядов способствует формированию высокотемпературных модификаций Al_2O_3 и возникновению неравновесных условий, в результате чего в процесс оксидирования вовлекаются компоненты из электролита [19–22]. Под дополнительным действием электрофоретической составляющей происходит легирование оксидного покрытия, а также формируются сложные смеси оксидов. Таким образом, в зависимости от режима МДО и выбора электролита можно получать керамические композиционные алюмооксидные покрытия заданного химического состава.

Для разработки оптимального технологического режима МДО алюминия и его сплавов в наноцентре НИЦ «Курчатовский институт» — «ЦНИИ КМ «Прометей» совместно со специалистами СП «Инжиниринг» введена в эксплуатацию уникальная установка ИПТ-1000, которая не имеет аналогов в России (рис. 1). Установка включает источник питания с блоком управления и гальваническую ванну. Электрическая часть установки состоит из силового блока, блока управления и измерения параметров процесса. Источник питания позволяет последовательно регулировать в ванне ток силой до 100 А с погрешностью $\pm 0,3$ А и напряжение от 0 до 1000 В. Регулировка напряжения и силы тока



Рис. 1. Установка ИПТ-1000 для МДО

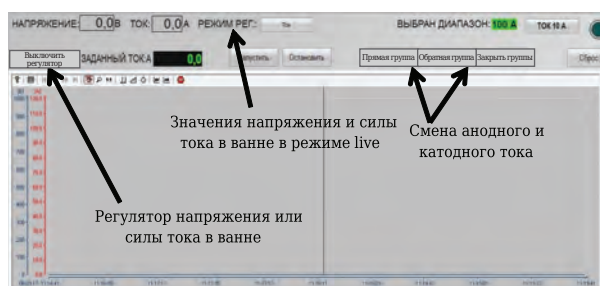


Рис. 2. Окно запуска МДО-процесса в программно-аппаратном комплексе под управлением Simatic WinCC Explorer

реализуется в программно-аппаратном комплексе под управлением Simatic WinCC Explorer (рис. 2). Система обработки данных позволяет отслеживать зависимости изменения напряжения и силы тока от продолжительности процесса МДО. Электролитическая ванна (рис. 3) вместимостью 150 л снабжена системой охлаждения. Перемешивание электролита осуществляется механически с помощью лопастной мешалки с приводом от электродвигателя. Деталь для МДО крепится к изолированной подвеске резьбовым соединением.

Программно-аппаратный комплекс под управлением Simatic WinCC Explorer был существенно модернизирован специалистами наноцентра и СП «Инжиниринг», что позволило проводить МДО алюминия и других вентильных металлов не только при постоянном токе, но и в импульсном анодно-катодном режиме с частотой импульсов от 500 мс. МДО на импульсном токе открывает новые

Сравнение традиционного анодирования и МДО алюминия

Показатели	Анодирование	МДО
Характеристика электролита	Сильно концентрированный раствор серной кислоты	Слабощелочной или слабокислый, без тяжелых металлов
Воздействие электролита на деталь	Оказывает сильное растворяющее воздействие	Не оказывает сильного растворяющего воздействия
Скорость формирования покрытия, мкм/мин	До 0,5	До 1,5
Скорость коррозии, мм/год	$\geq 0,015$	$\leq 0,008$
Толщина покрытия, мкм	До 50	До 150 мкм
Микротвердость, ГПа	До 5	> 10

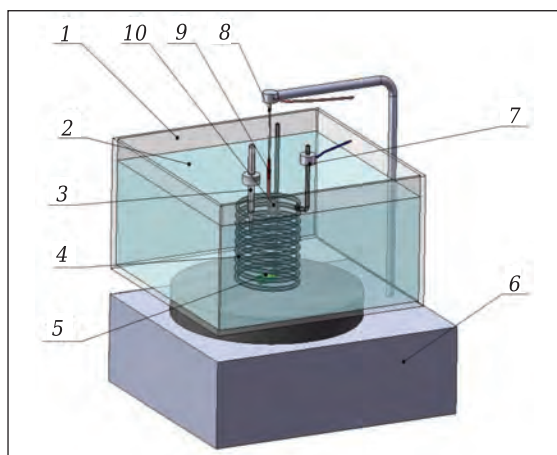


Рис. 3. Основные узлы установки МДО: 1 — ванна; 2 — электролит; 3 — термометр; 4 — змеевик; 5 — магнит; 6 — магнитная мешалка; 7 — отрицательный полюс источника постоянного тока; 8 — токопровод; 9 — термоусадочная изоляционная труба; 10 — образец

возможности в области исследований синтеза керамических покрытий, обладающих повышенной трещиностойкостью [23–25].

ВЫБОР ЭЛЕКТРОЛИТОВ ДЛЯ МДО АЛЮМИНИЯ

При выборе состава электролита следует учитывать, что для промышленных условий МДО алюминия должны соблюдаться следующие требования [26]:

- электролит должен обеспечивать возможность получения на деталях покрытий с высокими физико-химическими характеристиками, такими как износостойкость, коррозионная стойкость;
- процесс формирования покрытия должен быть оперативно управляемым и максимально производительным;
- электролит должен быть простым по составу, надежным в эксплуатации и экологически безопасным;
- способы контроля состава, в том числе при необходимости корректировки электролита, должны быть простыми и доступными.

Для микродуговой обработки деталей из алюминиевых сплавов или покрытых алюминием могут использоваться самые разнообразные кислотные, солевые и щелочные электролиты [27]. Наиболее распространенным электролитом для МДО алюминия является комбинированный силикатно-щелочной электролит типа $\text{KOH}-\text{Na}_2\text{SiO}_3$. В этом составе KOH является активатором, который влияет на растравливающую способность, что позволяет формировать упрочненный слой внутри оксидируемой поверхности относительно номинального размера детали; это приводит к существенному увеличению адгезионной прочности покрытий. Жидкое стек-

ло Na_2SiO_3 выступает как пассиватор и, адсорбируясь, создает на металле пленку с высоким электросопротивлением. Благодаря этому при анодной поляризации становится возможным появление искровых разрядов, приводящих к синтезу высокотемпературных модификаций Al_2O_3 . В силикатно-щелочном электролите на поверхности алюминиевой основы формируются сложные по фазовому составу композиционные покрытия, в которых $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (корунд) выступает как упрочняющая фаза.

Авторы настоящей статьи провели экспериментальные исследования МДО алюминия технической чистоты марки А5 (содержание Al не менее 99,5 %) в силикатно-щелочном электролите состава NaOH (2 г/л) + Na_2SiO_3 (9 г/л). Определены зависимости физико-механических свойств покрытий от продолжительности процесса и плотности тока на материале, что позволило определить оптимальный технологический режим МДО алюминия. Установлено, что оптимальным режимом является выдержка материала в электролите в течение 1,5 ч при заданной плотности тока 10 А/дм². В результате формируется износ- и коррозионно-стойкое покрытие, имеющее толщину в диапазоне 80–100 мкм и микротвердость 10 ГПа.

Фазовый состав покрытия представляет собой тугоплавкую и термически стойкую фазу муллита сложного стехиометрического состава $\text{Al}_{4,64}\text{Si}_{1,36}\text{O}_{9,68}$ с небольшим количеством корунда. На рис. 4 показан фрагмент структуры среза покрытия на глубину порядка 80 мкм. Установлено, что содержание SiO_3^{2-} -ионов в электролите и выделение ионов H^+ на аноде приводят к образованию неустойчивой метакремниевой кислоты на границе раздела алюминий – электролит с последующим ее разложением на фазу SiO_2 . Эта фаза электрофоретически осаждается в виде тонкой пленки на поверхности покрытия и взаимодействует с Al_2O_3 в микроплазменных каналах, что приводит к образованию муллита. Часто образующуюся пленку SiO_2 трактуют в научной литературе как рыхлый хрупкий технологический слой, требующий зашлифовки для обеспечения прочностных свойств покрытия [28]. Результаты исследования авторов показывают, что к недостаткам МДО алюминия по оптимальному технологическому режиму в силикатно-щелочном электролите следует отнести высокую пористость синтезируемых покрытий (до 20 об. %) с образованием внутренних эллиптических пор размерами до 60 мкм, имеющих сложную геометрию.

В качестве пассиватора вместо силикатов в электролитах для МДО алюминия могут выступать соли некоторых кислот, например бораты, цитраты, тартраты, иногда сукцинаты и ацетаты [29]. Боратный электролит является наиболее предпочтительным ввиду высокой стабильности (стойкости к окислению на аноде). Процесс МДО

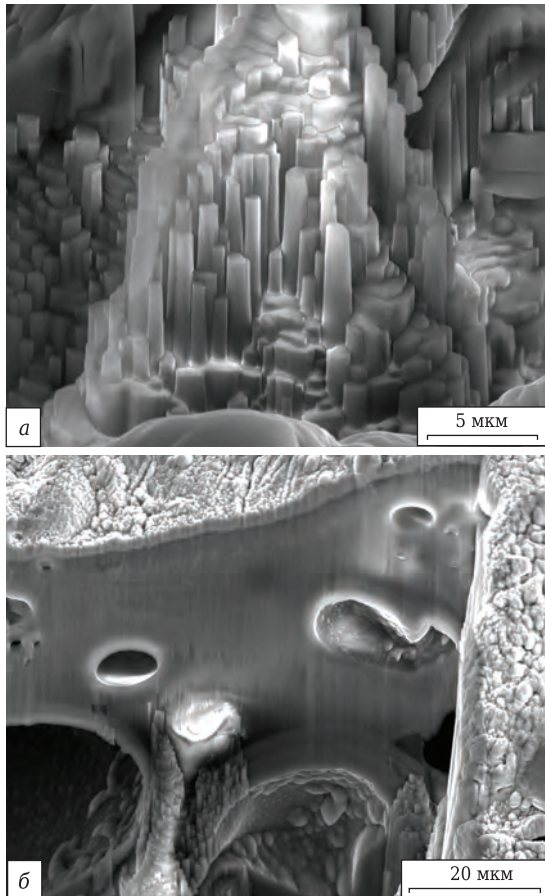


Рис. 4. Игольчатая структура муллита (а), фрагмент МДО-покрытия (б)

в боратных электролитах на сегодняшний день мало исследован, так как силикатно-щелочные электролиты дешевле и экологически безопасны. Однако при замене силиката на борат исключается возможность образования побочных фаз в оксидной пленке в процессе МДО, приводящих к улучшению функциональных свойств покрытия, таких как твердость и износостойкость. Из экономических соображений авторами предложено готовить боратный электролит смешением борной кислоты и щелочи.

Были проведены исследования МДО алюминия в боратном электролите состава H_3BO_3 (25 г/л) + KOH (5 г/л). Определено влияние плотности тока на образование оксидного слоя. Показано, что при малой плотности тока в покрытии образуются продольные поры; при больших плотностях тока процесс МДО сопровождается трещинообразованием. Выбран оптимальный режим МДО алюминия на постоянном токе — 5 А/дм² [30]. Установлены общие характеристики процесса МДО в боратном электролите. Анодирование алюминия продолжается в течение 5–7 мин и сопровождается быстрым ростом напряжения в ванне до образования первых искровых разрядов. Стабильный процесс МДО наблюдается при напряжении порядка 400 В (рис. 5). Формирование толщины ок-



Рис. 5. Микроплазменные разряды на поверхности алюминиевой детали (МДО)

сидной пленки приводит к повышению сопротивления покрытия и, как следствие, к постепенному росту напряжения в диапазоне 500–520 В (рис. 6).

МДО в боратном электролите формирует на поверхности алюминия покрытие, которое содержит фазы $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$ и $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. Фаза $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$ (плотность 3,61 г/см³) имеет аналогичные физико-химические характеристики с $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (плотность 3,68 г/см³) и значительно уступает корунду по механическим свойствам, что приводит к снижению твердости и является нежелательным с точки зрения получения износостойкого покрытия. С увеличением продолжительности МДО происходит переход $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$ в $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. Содержание корунда достигает 80 % при продолжительности действия дуговых разрядов 2–2,5 ч (рис. 7).

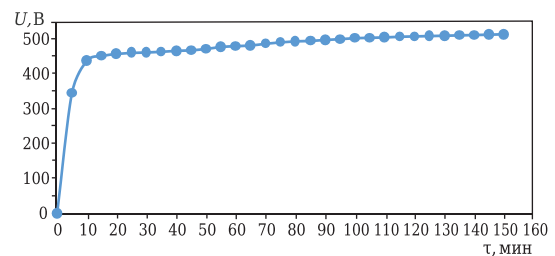


Рис. 6. Изменение напряжения U в электролитической ванне в зависимости от продолжительности t МДО

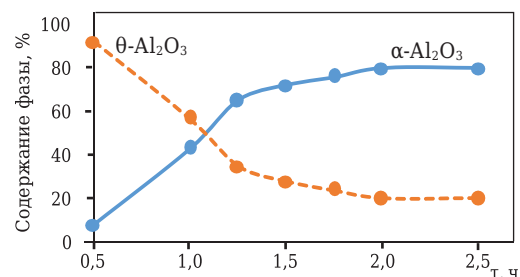


Рис. 7. Изменение фазового состава от продолжительности t МДО алюминия в боратном электролите. Плотность тока 5 А/дм²

Структура МДО-покрытия на алюминии в боратном электролите имеет классический вид «апельсиновой корки» (рис. 8). Видно, что Al_2O_3 синтезируется в виде округлых «кратеров» в зонах плазменных каналов (разрядов). В процессе синтеза происходят рост и наложение «кратеров» друг на друга, а плазменные каналы заполняются оксидным слоем, устраняя поры. Установлено, что обработка алюминия в боратном электролите в течение 2,5 ч при плотности тока 5 А/дм^2 приводит к образованию керамического алюмооксидного покрытия пористостью не более 10 об. % и толщиной порядка 50–60 мкм (рис. 9).

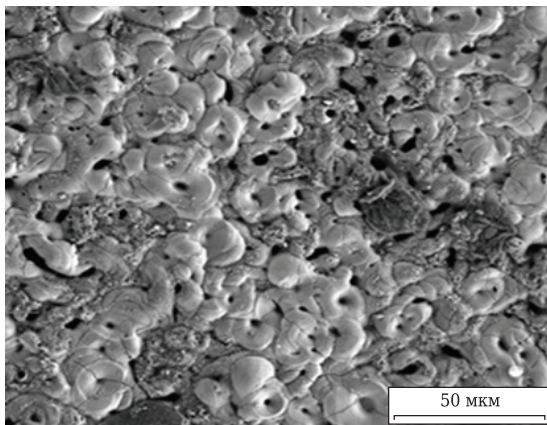


Рис. 8. Поверхность керамического МДО-покрытия



Рис. 9. Алюминиевый пуансон для отливки пластика с МДО-покрытием, полученным в боратном электролите

АЛЮМООКСИДНЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ НА СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЯХ

Получение положительных результатов при синтезе эффективных МДО-покрытий на алюминиевых деталях показало возможность проведения МДО на стальных деталях за счет формирования на их поверхности алюминиевого покрытия.

В настоящее время существуют разные способы алитирования стали, применяемые в промышленности [31], такие как диффузионное насыщение поверхности изделий алюминием,

газопламенное и плазменное напыление металла, плакирование, испарение алюминия в вакууме. Самым распространенным методом является горячее алюминирование, которое проводят в ваннах с расплавленным металлом. Стальной образец нагревают в печи с окислительной средой до 450°C для удаления остатков смазочных масел и создания на поверхности изделия тонкой пленки оксидов железа. Затем образец поступает в печь с восстановительной средой, в которой при $730\text{--}800^\circ\text{C}$ оксиды железа восстанавливаются. После охлаждения в печи образец погружают в ванну с алюминиевым расплавом и охлаждают на воздухе.

Для реализации многоступенчатой технологии алитирования с последующим МДО напыленного алюминия весьма перспективен также метод газотермического напыления, который разработан и освоен специалистами компании «ВИАСМ» во главе с В. И. Кубанцевым [32]. Сущность метода заключается в обработке стальных деталей в роторах, наполненных одно- или многокомпонентными порошками (алюминия, цинка, хрома и др.), переменным электромагнитным полем. При различной интенсивности химикотермической обработки на поверхности стальных деталей образуется прочное равномерное покрытие алюминия толщиной порядка 30 мкм. После нанесения алюминиевого подслоя можно наносить покрытия с использованием МДО.

Авторами настоящей статьи предложен и экспериментально подтвержден оптимальный подход к созданию новых керамических покрытий на основе Al_2O_3 , в соответствии с которым сверхзвуковым холодным газодинамическим напылением (ХГДН) сначала на поверхности стальной детали формируется алюминиевое покрытие заданной толщины, содержащее упрочняющие керамические наночастицы Al_2O_3 . Затем покрытие подвергается микродуговому оксидированию в боратном электролите, в результате чего образуется износостойкое керамическое покрытие, которое характеризуется постепенным изменением твердости по толщине.

Основой разработки является существенный научно-технический задел в области исследования ХГДН [33–38]. Специалистами нанопроцесса в течение последних лет разработаны практические рекомендации по использованию метода ХГДН для получения функциональных покрытий в условиях производства. На примере алюминиевого порошка марки АСД-1 оптимизированы температурно-скоростные параметры процесса, обеспечивающие высокие адгезию и твердость покрытия при максимальной производительности и высоком коэффициенте использования порошка [39]. В качестве металлической основы для синтеза керамического покрытия были использованы пластины, изготовленные из конструкционной углеродистой стали мар-

ки Ст45. Упрочненный алитированный слой на стальной основе был сформирован за счет напыления порошка алюминия, армированного наноразмерными частицами корунда (рис. 10).

Установлено, что в процессе напыления агломераты нанокорунда, «не закрепленные» в алюминиевой матрице, ликвидируют образующиеся поры, снижая пористость покрытия до 3 об. %. На рис. 11 показана схема упаковки частиц алюминия в поперечном сечении после ХГДН смеси порошков с армированием нанокорундом и без армирования. Покрытие, полученное комбинацией ХГДН с МДО, можно условно разделить на три слоя: основной слой, обладающий высокой твердостью, плотностью и износостойкостью; слой ХГДН, упрочненный нанокорундом; металлическая основа. На рис. 12 показан снимок функционально-градиентного керамического покрытия в поперечном сечении. Основные характеристики синтезированного износостойкого покрытия приведены ниже:

Общая толщина покрытия, мкм.....	80
Толщина МДО-покрытия, мкм.....	50
Микротвердость МДО-слоя, ГПа.....	20
Адгезия к подложке, МПа.....	60
Скорость коррозии, мм/год.....	0,007

Трибологические испытания показывают, что при контактном взаимодействии (трении) происходит износ стального контртела, в результате образуется намол стального порошка на кольцо с покрытием. При трибологических испытаниях использовали традиционный режим нагрузки, частоты вращения и пути трения, применяемые для оценки износа твердых сплавов в паре трения со сталью. Следовательно, сделан вывод о высокой износостойкости покрытия. Специалистами наноцентра совместно с Институтом проблем машиноведения РАН разработан экспериментальный подход к экспресс-оценке изношенного объема керамики. Метод заключается в определении изношенного микрообъема керамики при непродолжительном трении по изменению параметра шероховатости R_a [40, 41]. Установлено, что износостойкость синтезированных керамических покрытий на стали сопоставима с износостойкостью монокристаллических алюмооксидных керамических материалов [41].

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РАЗРАБОТАННЫХ МДО-ПОКРЫТИЙ НА АЛЮМИНИИ

На сегодняшний день наноцентр ведет творческое сотрудничество с ведущими промышленными предприятиями России. На рис. 13 показаны детали с разработанными керамическими МДО-покрытиями, нашедшими практическое применение в промышленности. Анализ исследований микродугового оксидирования

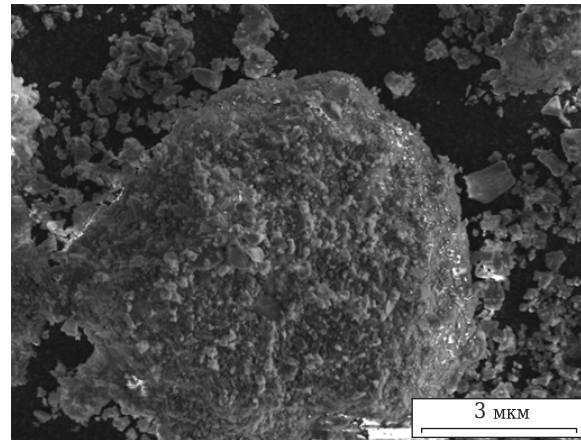


Рис. 10. Частица порошка алюминия, армированная нанокорундом

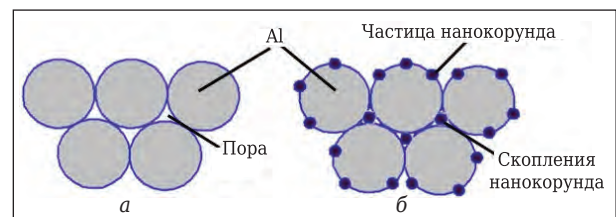


Рис. 11. Схема заполнения пор нанокорундом: а — напыление без армирования; б — напыление с армированием

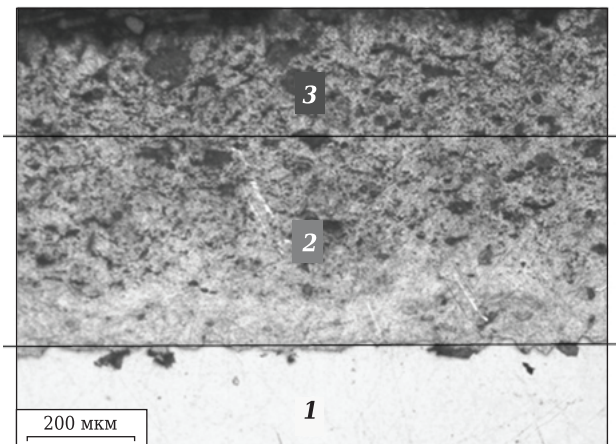


Рис. 12. Функционально-градиентное керамическое покрытие: 1 — стальная подложка; 2 — переходное ХГДН-МДО-покрытие; 3 — МДО-покрытие

алюминия позволяет выделить реальные перспективы использования разработанных покрытий:

- повышение износо- и коррозионно-стойкости алюминиевых деталей погружных насосов, алюминиевых деталей поршней и цилиндров двигателей;



Рис. 13. Детали с разработанными МДО-покрытиями: а — направляющие системных блоков авиационной техники без покрытия (слева) и с МДО-покрытием (справа); б — детали подвижных механизмов морской и авиационной техники с МДО-покрытием; в — МДО на крупногабаритной плите пресс-формы с площадью поверхности 40 дм²

- защитно-декоративное покрытие алюминиевой посуды;
- защита алюминиевых микросхем, радиаторов и тиристоров;
- защита от истирания алюминиевых модулей кабелей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показаны реальные преимущества МДО алюминия по сравнению с анодированием.
2. Приведены экспериментальные данные по получению в наноцентре НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей» износ- и коррозионно-стойких МДО-покрытий на алюминии в различных электролитах.
3. Описан разработанный способ формирования износ- и коррозионно-стойких керамических наноструктурированных покрытий на

стали с комплексным использованием методов МДО и сверхзвукового гетерофазного переноса. Синтезированные покрытия являются выгодной экономичной альтернативой конструкционным алюмооксидным керамическим материалам.

4. Показаны возможности практического использования алюминиевых деталей с МДО-покрытиями.

Экспериментальные исследования выполнены на оборудовании Центра коллективного пользования научным оборудованием «Состав, структура и свойства конструкционных и функциональных материалов» НИЦ «Курчатовский институт» — ЦНИИ КМ «Прометей» при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки в рамках соглашения № 14.595.21.0004, уникальный идентификатор RFMEFI59517X0004.

Библиографический список

1. **Хенли, В. Ф.** Анодное оксидирование алюминия и его сплавов ; пер. с англ. / В. Ф. Хенли ; под ред. В. С. Синявского. — М. : Металлургия, 1986. — 152 с.
2. **Черненко, В. И.** Получение покрытий анодно-искровым электролизом / В. И. Черненко, В. И. Снежко, И. И. Папанова. — Л. : Химия, 1991. — 128 с.
3. **Корш, С. В.** Технология микродугового оксидирования из титановых и алюминиевых сплавов / С. В. Корш // Прогрессивные материалы и технологии. — 1993. — № 1. — С. 188, 189.
4. **Барыкин Н. В.** Разработка технологии восстановления и упрочнения деталей из алюминиевых сплавов микродуговым оксидированием : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.03. — М. , 1994. — 19 с.
5. **Sun, S.** Long-term atmospheric corrosion behavior of aluminium alloys 2024 and 7075 in urban, coastal and industrial environments / S. Sun, Q. Zheng, D. Li, J. Wen // Corros. Sci. — 2009. — Vol. 51. — P. 719–727.
6. **Harvey, T. G.** Cerium based conversion coatings on aluminium alloys: a process review / T. G. Harvey // Corros.

- Eng. Sci. Technol. — 2013. — Vol. 48. — P. 248–269.
7. **Bozza, A.** Pulsed current effect on hard anodizing process of 7075-T6 aluminium alloy / A. Bozza, R. Giovanardi, T. Manfredini [et al.] // Surf. Coat. Technol. — 2015. — Vol. 270. — P. 139–144.
8. **Недозоров, П. М.** Оптические свойства содержащих ZrO₂ анодных покрытий на алюминии / П. М. Недозоров, К. Н. Клиш, Т. П. Яровая [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. — 2001. — Т. 68, № 4. — С. 512–514.
9. **Васильева, М. С.** Каталитическая активность марганецсодержащих слоев, сформированных анодно-искровым осаждением / М. С. Васильева, В. С. Руднев, Н. Б. Кондриков [и др.] // Журнал прикладной химии. — 2004. — Т. 77, № 2. — С. 222–225.
10. **Matykina, E.** Plasma electrolytic oxidation of pre-anodized aluminium / E. Matykina, R. Arrabl, A. Mohamed [et al.] // Corros. Sci. — 2009. — Vol. 51. — P. 2897–2905.
11. **Yang, X.** Enhanced in vitro biocompatibility/bioactivity of biodegradable Mg–Zn–Zr alloy by micro-

- arc oxidation coating contained Mg_2SiO_4 / X. Yang, M. Li, X. Lin [et al.] // Surf. Coat. Technol. — 2013. — Vol. 233. — P. 65–73.
12. **Гнеденков, С. В.** Защитные покрытия на сплаве магния МА8 / С. В. Гнеденков, С. Л. Синебрюхов, О. А. Хрисанфова [и др.] // Коррозия: материалы, защита. — 2010. — № 12. — С. 18–29.
13. **Карпушенков, С. В.** Микроплазменное электрохимическое осаждение на поверхность железа композиционных покрытий на основе оксида алюминия и полиэтилена / С. А. Карпушенков, А. И. Кулак, Г. Л. Шукин [и др.] // Физикохимия поверхности и защита материалов. — 2010. — Т. 46, № 4. — С. 387–392.
14. **Guo, J.** Preparation and performance of a novel multifunctional plasma electrolytic oxidation composite coating formed on magnesium alloy / J. Guo, L. Wang, S. C. Wang [et al.] // J. Mater. Sci. — 2009. — Vol. 44. — P. 1998–2006.
15. **Ракоч, А. Г.** Создание многофункциональных покрытий на поверхности изделий из легких конструкционных сплавов / А. Г. Ракоч, И. В. Бардин // Всероссийская молодежная школа-конференция «Современные проблемы металловедения», Пизунда, Республика Абхазия, 18–22 мая 2009 г. — М. : МИСиС, 2009. — С. 49–60.
16. **Руднев, В. С.** Каталитически активные структуры на металлах / В. С. Руднев, Н. Б. Кондриков, Л. М. Тырина [и др.] // Сер. Критические технологии. Мембраны. — 2005. — № 4 (28). — С. 63–67.
17. **Liu, X.** Preliminary study on preparation of black ceramic coating formed on magnesium alloy by micro-arc oxidation in carbon black pigment-contained electrolyte / X. Liu, G. Liu, J. Xie // Procedia Engineering. — 2012. — Vol. 36. — P. 261–269.
18. **Руднев, В. С.** Гибридные политетрафторэтилен-оксидные покрытия на алюминии и титане, сформированные методом плазменно-электролитического оксидирования / В. С. Руднев, А. А. Ваганов-Вилькинс, П. М. Недозоров [и др.] // Физикохимия поверхности и защита материалов. — 2013. — Т. 49, № 1. — С. 95–103.
19. **Гордиенко, П. С.** Образование покрытий на аноднополяризованных электродах в водных электролитах при потенциалах искрения и пробоя / П. С. Гордиенко. — Владивосток : Дальнаука, 1996. — 216 с.
20. **Yerokhin, A. L.** Plasma electrolysis for surface engineering / A. L. Yerokhin, X. Nie, A. Leyland [et al.] // Surf. Coat. Technol. — 1999. — Vol. 122. — P. 73–93.
21. **Ракоч, А. Г.** Анодирование легких сплавов при различных электрических режимах. Плазменно-электролитическая нанотехнология / А. Г. Ракоч, А. В. Дуб, А. А. Гладкова. — М. : Старая Басманная, 2012. — 496 с.
22. **Гордиенко, П. С.** Микродуговое оксидирование металлов и сплавов / П. С. Гордиенко, В. А. Достовалов, А. В. Ефименко. — Владивосток : ДВФУ, 2013. — 522 с.
23. **Чубенко, А. К.** Роль длительности токового импульса как фактора управления физико-механическими характеристиками анодно-оксидных покрытий на примере сплава алюминия Д16 / А. К. Чубенко, А. И. Мамаев, Ю. Ю. Будницкая, Т. И. Дорофеева // Научно-технический вестник Поволжья. — 2013. — Т. 2. — С. 62–64.
24. **Гордиенко, П. С.** Микродуговое оксидирование при импульсной поляризации в гальванодинамическом режиме / П. С. Гордиенко, Д. В. Достовалов, И. Г. Жевтун, И. А. Шабалин // Электронная обработка материалов. — 2013. — Т. 49. — С. 35–42.
25. **Мальшев, В. Н.** Упрочнение поверхностей трения методом микродугового оксидирования : дис. ... докт. техн. наук. — М., 1999. — 53 с.
26. **Грихилес, С. Я.** Электролитические и химические покрытия. Теория и практика / С. Я. Грихилес, К. И. Тихонов. — Л. : Химия, 1990. — 288 с.
27. **Суминов, И. В.** Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов. В 2 т. Т. 2 : монография / И. В. Суминов, П. Н. Белкин, А. В. Эпельфельд [и др.]. — М. : Техносфера, 2011. — 512 с.
28. **Кузнецов, Ю. А.** Оценка стабильности электролита при плазменно-электролитическом оксидировании деталей. Аграрная наука — основа успешного развития АПК и сохранения экосистем / Ю. А. Кузнецов, В. Х. Алимов // Материалы международной научно-практической конференции. В 2 т. Т. 2. — Волгоград : Волгогр. ГАУ, 2012. — С. 251–254.
29. **Бердинов, В. Ф.** Нанесение корундовых покрытий на алюминиевую подложку методом микродугового оксидирования / В. Ф. Бердинов // Вестник машиностроения. — 1991. — № 4. — С. 64, 65.
30. **Красиков, А. В.** Исследование образования керамических покрытий микродуговым оксидированием в боратном электролите / А. В. Красиков, М. А. Марков, А. Д. Быкова // Изв. Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). — 2016. — № 36 (62). — С. 41–44.
31. **Лактин, Ю. М.** Материаловедение. 3-е изд., перераб. и доп. / Ю. М. Лактин, В. П. Леонтьева. — М. : Машиностроение, 1990. — 528 с.
32. **Кубанцев, В. И.** Изготовление металлокомпозиционных защитных покрытий способом термодиффузии в переменном электромагнитном поле / В. И. Кубанцев, Б. В. Фармаковский, Е. М. Рязанов [и др.] // Вопросы материаловедения. — 2014. — № 3 (79). — С. 47–59.
33. **Герашенков, Д. А.** Исследование адгезионной прочности композиционных армированных покрытий системы металл – неметалл, полученных методом холодного газодинамического напыления / Д. А. Герашенков, Б. В. Фармаковский, Е. А. Самоделкин, Е. Ю. Герашенкова // Вопросы материаловедения. — 2014. — № 2 (78). — С. 103–117.
34. **Герашенков, Д. А.** Исследование температуры потока в процессе холодного газодинамического напыления функциональных покрытий / Д. А. Герашенков, А. Ф. Васильев, Б. В. Фармаковский, А. Ч. Машек // Вопросы материаловедения. — 2014. — № 1 (77). — С. 87–96.
35. **Пат. 2354749 Российская Федерация.** Способ получения наноструктурированных функционально-градиентных износостойких покрытий / Горынин И. В., Фармаковский Б. В., Герашенков Д. А., Васильев А. Ф. — № 2007113724/02 ; заявл. 12.04.07 ; опубл. 10.05.09.
36. **Фармаковский, Б. В.** Износостойкие функционально-градиентные покрытия на основе квазикристаллов, полученные методом сверхзвукового холодного га-

зодинамического напыления / Б. В. Фармаковский, Д. А. Геращенко, Р. Ю. Быстров [и др.] // Вопросы материаловедения. — 2017. — Т. 90, № 2. — С. 130–135.

37. **Геращенко, Д. А.** Алюмоматричные функциональные покрытия с высокой микротвердостью, полученные из композиционных порошков системы Al-Sn + Al₂O₃ методом холодного газодинамического напыления / Д. А. Геращенко, А. С. Орыщенко // Вопросы материаловедения. — 2015. — № 3 (83). — С. 100–107.

38. **Марков, М. А.** Синтез износостойких керамических покрытий на стальных материалах с комплексным использованием методов сверхзвукового гетерофазного переноса и микродугового оксидирования / М. А. Марков, А. В. Красиков, Д. А. Геращенко [и др.] // Огнеупоры и техническая керамика. — 2016. — № 10. — С. 30–35.

39. **Макаров, А. М.** Оптимизация параметров процесса напыления покрытий методом ХГДН применительно к условиям производства на примере порошка алюминия / А. М. Макаров, Д. А. Геращенко, А. Ф. Васильев // Вопросы материаловедения. — 2017. — Т. 90, № 2. — С. 116–123.

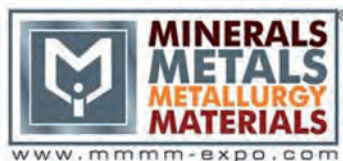
40. **Марков, М. А.** Экспресс-оценка трибологических свойств износостойких материалов / М. А. Марков, А. А. Кукина, Ю. А. Фадин // Изв. вузов. Приборостроение. — 2016. — Т. 59, № 8. — С. 641–644.

41. **Фадин, Ю. А.** Оценка износостойкости материалов на основе оксида алюминия / Ю. А. Фадин, М. А. Марков, С. С. Орданьян // Огнеупоры и техническая керамика. — 2015. — № 4/5. — С. 8–10. ■

Получено 03.10.17

© М. А. Марков, А. Д. Быкова, А. В. Красиков, Б. В. Фармаковский, Д. А. Геращенко, 2018 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



12th International Exhibition & Conference
29 - 31 August 2018
Pragati Maidan, New Delhi, India



CO-SPONSORED BY
Ministry of Steel
Ministry of Mines
Ministry of Earth Sciences
Ministry of External Affairs
Ministry of Micro Small & Medium Enterprises
Department of Commerce
Ministry of Heavy Industries and Public Enterprises
Council of Scientific & Industrial Research
GOVERNMENT OF INDIA

MINERALS, METALS, METALLURGY & MATERIALS 2018 (MMMM)

12-я Международная выставка металлургической и горнодобывающей промышленности

29–31 августа 2018 г.
г. Дели, Индия

Тематика:

- оборудование и технологии для производства металлов
- сталелитейное оборудование
- прокатные станы
- производство алюминия, меди, цинка, свинца
- производства нержавеющей стали
- производство труб и трубопроводов
- производство и обработка листового металла
- **огнеупоры**
- оборудование и технологии для горнодобывающей промышленности
- подъемно-транспортное оборудование
- технологии металлообработки
- оборудование для литья, формовки иковки металлов
- обработка поверхностей и защита от коррозии
- оборудование и технологии для сварки и резки
- системы автоматизации
- контрольно-измерительное оборудование
- технологии безопасности и средства защиты и др.

<http://www.mmmm-expo.com/>