

На основі огляду літературних даних і виконаних досліджень авторів узагальнено інформацію по методу мікродугового оксидування, властивостям МДО-покрив на алюмінієвих сплавах, застосуванню МДО-покрив в машинобудуванні

Ключові слова: алюмінієві сплави, анодування, мікродугове оксидування

На основе обзора литературных данных и выполненных исследований авторов обобщена информация по методу микродугового оксидирования, свойствам МДО-покрытий на алюминиевых сплавах и применению МДО-покрытий в машиностроении

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, анодирование, микродуговое оксидирование

In the article information about the microarc oxidation method, properties of MAO-coatings on aluminum alloys and MAO-coatings use in engineering are generalized on the basis of literary facts review and researches performed by the authors

Key words: aluminum alloys, anodizing, microarc oxidation

МЕТОД МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

В. В. Тихоненко

Ассистент*

E-mail: tihonenko_vv@mail.ru

А. М. Шкилько

Кандидат физико-математических наук, приват-профессор

*Кафедра физики, теоретической и общей электротехники

Украинская инженерно-педагогическая академия
ул. Университетская, 16, г. Харьков, Украина, 61003

Контактный тел.: (057) 733-78-54

E-mail: kafedra@oef.uipa.kharkov.ua

1. Введение

Одним из наиболее перспективных способов поверхностного упрочнения является метод микродугового оксидирования (МДО), который позволяет получать на деталях из вентильных металлов (Al, Ti, Zr, Mg и др.) и их сплавов керамические покрытия, отличающиеся высокими изоляционными, механическими, электро- и теплофизическими характеристиками и эксплуатационными свойствами, что обусловило широкое использование этих покрытий в машиностроении, нефтегазодобывающей промышленности, на транспорте, в приборостроении, радиоэлектронике, авиационной и космической и других отраслях.

Сущность МДО заключается в том, что под действием высокого напряжения, прикладываемого между находящейся в электролите деталью и электродом, на поверхности детали возникают мигрирующие точечные микродуговые разряды, под термическим, плазмохимическим и гидродинамическим воздействием которых поверхностный слой детали перерабатывается в керамическое покрытие, прочносцепленное с основой.

2. Анализ проблемы и постановка задачи

В истории развития исследований в этой области отметим такие этапы: открытие явления гальванолюминесценции при электролизе русским ученым Н.П. Слугиным; обнаружение искрения на аноде при анодировании в области повышенных напря-

жений в 1930-х гг. немецкими исследователями А. Гюнтершюльце и Г. Бетц; работы американских ученых У. Макнейла и Л. Грасса, опубликованные в 50-60-х гг., по использованию реакций, протекающих в анодной искре, для синтеза сложных оксидных покрытий из компонентов подложки и электролита. После обнаружения и исследования в 1969 г. Г.А. Марковым начальных и граничных условий анодного процесса, при которых за искрением возникают более мощные разряды, формирующие покрытие с высокими защитными характеристиками [1, 2], метод МДО стал широко изучаться как в странах бывшего СССР, так и за рубежом. В настоящее время идет активное развитие метода МДО, включающее: разработку теоретических основ, совершенствование технологии получения МДО-покрытий с оптимальными характеристиками, создание новых технологических источников питания, расширение областей практического использования; соответственно наблюдается рост публикаций по данной тематике.

Разрабатываемый и изучаемый авторами этот способ поверхностного упрочнения деталей из алюминиевых сплавов позволяет избавиться от недостатков, присущих многим другим способам [3]. На основе известных литературных данных и собственных исследований проведен анализ эффективности технологии получения многофункциональных покрытий методом МДО и проблем внедрения ее на предприятиях, выделен круг требующих решения актуальных вопросов [4].

Целью настоящей работы является исследование процесса МДО алюминиевых сплавов, физико-механических свойств получаемых защитных покрытий и применения МДО-покрытий в машиностроении.

3. Модельные представления о механизме формирования МДО-покрытий

Процесс МДО состоит из последовательно протекающих нескольких стадий (см. рис.1). Вначале происходит формирование диэлектрической пленки в безыскровом режиме, при этом механизм процесса аналогичен традиционному анодированию металлов в водных электролитах, область 1 соответствует электрохимическим законам М. Фарадея, поэтому ее чаще называют «фарадеевской областью». В искровом режиме (область 2) на поверхности происходит равномерное свечение мелких перемещающихся искр, в микродуговом – перемещение более крупных желто-красных разрядов, а при дуговом режиме происходит частичное разрушение покрытий. Причины перехода от одной стадии процесса оксидирования к другой объясняются изменениями в области объемного заряда в структуре покрытия и изменениями электрических и тепловых параметров осуществления микроплазменных разрядов [5].

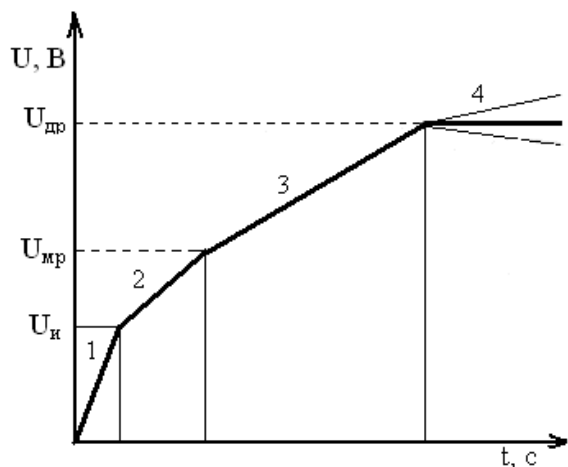


Рис. 1. Полная формовочная кривая процесса МДО [1, 6]: 1 – анодирование, 2 – искрение, 3 – микродуговой разряд, 4 – дуговой разряд.

К аналитическому описанию роста оксидных покрытий при МДО алюминиевых сплавов применяются различные подходы: основанные на классических электрохимических представлениях [7, 8] или построенные в рамках феноменологической модели [9, 10], однако, ввиду значительной сложности протекающих физико-химических процессов до сих пор отсутствует общепринятая модель формирования МДО-покрытий.

Мнения о механизме и локальных местах микроплазменных пробоев в системе «металл - оксидная пленка - парогазовая фаза – электролит» противоречивы. Множество предлагаемых теорий пробоя и возникновения искрения можно разделить на две группы [10]: ионный пробой, причиной которого считают вне-

дрение в оксид ионов электролита и соответственно локальный рост его ионной проводимости, и электронный пробой, причиной которого считают «инжектирование» электронов в зону проводимости оксида и электронную лавину, возникающую вследствие ударной ионизации. Второй теории придерживаются большинство исследователей.

По мнению ряда исследователей, рост покрытия происходит вследствие протекания следующих процессов: взаимодействие расплавленного вещества пленки в каналах разряда с компонентами электролита, последующее наплавление и встраивание дегидратированных анионов [11]; плазмохимический синтез, термические или термоэлектрохимические превращения компонентов плазмы в каналах разряда [9, 12]; электрохимический механизм (анодирование и электрофорез) [7, 13, 14].

Отметим, модельные представления о механизме протекания процесса МДО, разработанные авторами работ [12, 15]. В основе механизма лежат следующие положения:

- пробой парогазовой фазы, сформированной в сквозных порах покрытия;
- вынос плазмы на поверхность каналов микро-разрядов;
- параллельно протекающие процессы: экзотермическое взаимодействие окислителей с ювенильной поверхностью дна каналов микро-разрядов с последующим окислением испаряющихся атомов металлических компонентов сплава; осаждение на поверхности покрытия или втягивание в каналы микро-разрядов оксидов после плазмо- и термохимических преобразований составляющих электролита.

Корректные модельные представления о механизме протекания МДО алюминиевых сплавов могут стать тем «инструментом», который позволит управлять этим процессом и получать покрытия с требуемыми свойствами.

4. Преимущества и недостатки технологии МДО

В случае перехода на технологию МДО целесообразным становится сравнение с существующим этапом производства, от которого и берет свое начало МДО. Основным отличием процесса МДО от бывшего ему началом традиционного анодирования является использование энергии электрических разрядов, мигрирующих по обрабатываемой поверхности, погруженной в электролит, которые оказывают специфическое, плазмохимическое и гидродинамическое воздействия на металл основы, само покрытие и электролит, в результате чего формируются керамикоподобные покрытия с регулируемым в широком диапазоне элементным и фазовым составом, структурой и свойствами [6]. В табл.1 приведено сравнение традиционного анодирования и МДО [6, 16-18].

Сочетая в себе сущность процесса классического анодирования с положительными технологическими особенностями, МДО позволяет поднять качество формируемых защитных покрытий на более высокий уровень. В результате анализа технологии получения

МДО были выделены преимущества, связанные с особенностями:

- электролита: малая концентрация, экологичность и неагрессивность электролитов и самого процесса, так как в водный раствор вводятся относительно небольшие концентрации нетоксичных химических компонентов, возможность обработки сложнопрофильных деталей благодаря высокой рассеивающей способности электролита;
- осуществления технологического процесса: отсутствие необходимости тщательной предварительной подготовки поверхности детали (травления, обезжиривания, осветления, промывок горячей и холодной водой и т.д.) в начале технологической цепочки, что способствует минимизации производственных площадей и сокращения времени технологического процесса, устойчивый, легко воспроизводимый процесс;
- оборудования: возможность получения покрытий большой толщины без применения сложного холодильного оборудования, простое и легко управляемое оборудование, возможность автоматизации технологического процесса;
- свойств получаемых покрытий: возможность получения многофункциональных керамикоподобных покрытий, характеризующимися высокими эксплуатационными характеристиками и обладающими высокой адгезией, обработка не изменяет начальных размеров детали, так как покрытие формируется за счет преобразования поверхностного слоя, стабильность характеристик покрытий.

При переходе к этой технологии будет наблюдаться повышение производительности труда и, соответственно, расширится ассортимент предлагаемой высококачественной продукции при постепенном снижении себестоимости обработки по сравнению с анодированием. Однако, широкому применению технологии МДО в промышленности препятствуют следующие недостатки:

1. Повышение производительности МДО ограничено высокой энергоемкостью процесса, так как при получении толстых покрытий задают или большую плотность переменного тока, или увеличивают временную длительность проведения процесса МДО. Снизить энергозатраты при получении микродуговых покрытий возможно, к примеру, за счет использования новейших источников питания, технологических приемов, которые позволили бы минимизировать негативные последствия напряженных и супернапряженных режимов, или разработки энергосберегающих комбинированных режимов проведения МДО, что делает метод экономически эффективным.

2. Сложность получения равномерных, с требуемыми толщиной и функциональными свойствами покрытий на всю или заданную поверхность изделий сложной геометрической формы, которую можно устранить путем применения дополнительных противоеlectродов и диэлектрических экранов или технологии нанесения покрытий в проточном электролите.

Сравнение технологии МДО и традиционного анодирования

Характеристики	Классические анодные процессы в растворах электролитов	МДО
Тип электролита	кислотный	слабощелочной
Экологичность	использование агрессивных электролитов, требуются сложные очистные сооружения	экологичность и неагрессивность электролитов, не требуются очистные сооружения
Подготовки поверхности детали перед нанесением покрытия	многочисленные этапы подготовки (травление, обезжиривание), после каждого этапа требуется промывка детали	нет необходимости специальной подготовки поверхности (электрический разряд сам проводит очистку обрабатываемой поверхности)
Системы охлаждения	использование сложной дорогостоящей системы охлаждения в случае получения износостойких покрытий	возможность получения толстых (до 400 мкм) покрытий без применения сложного и экологически вредного холодильного оборудования
Напряжение, В	10-30	100-300 и более (до 1000 В)
Плотность тока, А/дм ²	до 10 (постоянный ток)	20-100 (переменный и импульсный)
Толщина, мкм	до 60	до 400
Твердость, ГПа	до 5-6	до 20-25

5. Особенности строения и свойства МДО-покрытий

МДО является сложным процессом, при котором решающее влияние на формирование оксидного слоя и его свойства оказывают состав и концентрация электролита, электрические (плотность тока, соотношение катодной и анодной составляющих тока) и временные параметры режима МДО, состав оксидируемого сплава. Авторы работы экспериментально исследовали влияние параметров обработки (концентрация КОН, концентрация Na_2SiO_3 , плотность тока и время оксидирования) на микротвердость и толщину упрочненного слоя на сплавах Д16, АМг6 и Ак5, в результате чего были: 1) определены аппроксимирующие функции зависимости микротвердости и толщины упрочненного покрытия от одного из выбранных режимов МДО при фиксированных значениях остальных технологических параметров; 2) построены полиномы, соответствующие множественным зависимостям моделируемых показателей качества от технологических параметров МДО, используя планирование эксперимента. Результаты исследований подтвердили, что варьируя концентрацией компонентов электролита,

плотностью тока и продолжительностью оксидирования, т.е. подобрав оптимальный режим, можно изменять в широких пределах структуру и свойства покрытий, сформированных способом МДО.

В процессе МДО покрытие растет как вследствие окисления химических элементов сплава, так и вследствие термических превращений компонентов электролита под воздействием микроплазменных разрядов, при этом происходит включение в структуру покрытия как составляющих электролита, так и компонентов сплава, приводящее к изменению свойств и параметров формирования покрытий [19]. Покрытия, получаемые на алюминии и его сплавах в силикатно-щелочном электролите, как правило, имеют трехслойную структуру и неравномерное распределение компонентов [13, 20, 21]: наружный технологический (30-100 мкм), основной рабочий (150-250 мкм) и переходной слой (3-5 мкм). Повышенное содержание элементов, инкорпорируемых в покрытие из электролита, наблюдается в переходном и, особенно, в наружном технологическом слое [20].

В результате плазмохимических и термохимических процессов при МДО на алюминиевых сплавах формируется покрытие переменного фазового состава, содержащее различные аллотропические модификации оксида алюминия: α - Al_2O_3 , δ - Al_2O_3 , γ - Al_2O_3 и муллита $2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$ [21, 22]. В составе пленок, получаемых обычным анодированием алюминиевых сплавов, стабильная высокотемпературная модификация α - Al_2O_3 не обнаруживается, так как переход метастабильной модификации оксида алюминия γ - Al_2O_3 в α - Al_2O_3 становится возможным лишь при температурах около 1000°C (в некоторых источниках 600 – 1800°C). Разная химическая природа ионов стабилизаторов фазы γ - Al_2O_3 при оксидировании разных сплавов объясняет отличие температуры перехода γ - $\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \alpha$ - Al_2O_3 . При МДО температура в разрядных каналах может достигать 2000 – 3000°C , в то время как электролит и деталь (анод) остаются сравнительно холодными [22].

Рассмотрим особенности фазового состава и свойств каждого из слоев МДО-покрытия. Основу наружного рыхлого (технологического) слоя МДО-покрытия, по данным рентгеноструктурного анализа, составляет муллит ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), который представлен в виде игольчатых кристаллов-двойников [22], встречаются также отдельные глобулы из α - и γ - Al_2O_3 . Такие классические кристаллы муллита присущи только приповерхностной зоне, в основном и переходном слоях МДО-покрытия муллит находится в мелкокристаллическом состоянии. Наружный слой характеризуется высокой шероховатостью, а также невысокой твердостью и износостойкостью, используется для нанесения различных органических, в том числе лакокрасочных покрытий. Основной слой (рабочий) слой в наибольшем количестве содержит фазу α - Al_2O_3 (корунд), которая обуславливает высокую микротвердость и износостойкость данного слоя. Максимальное содержание α - Al_2O_3 в этом слое, наиболее удаленной от обеих охлаждающих сред (подложки и электролита) определяется тем, что импульс высокой температуры в этой зоне наиболее длителен [12]. Переходный слой, который образуется в зоне соединения металла и по-

крытия, состоит из оксидов алюминия (α -, γ - Al_2O_3), муллита ($2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$) и частиц алюминия [22].

Исследование внешнего слоя является актуальной задачей, поскольку в научно-технической литературе сведений об этом недостаточно, по сравнению с исследованиями основного рабочего слоя МДО-покрытия, и они крайне противоречивы. Авторами [23] были проведены исследования физико-механических свойств наружного технологического слоя МДО-покрытий на алюминиевых сплавах различных групп с привлечением экзоэмиссионной диагностики и метода контактной разности потенциалов. По падению интенсивности экзоэмиссионного тока с поверхности покрытия в зоне дефекта оценивали пористость, используя методику, изложенную в [24].

Установлено, что после МДО-обработки значение поверхностного потенциала увеличивается и с течением времени возвращается в исходное состояние в результате адсорбции активных веществ окружающей атмосферы и других физико-химических процессов, протекающих на поверхности. Значение поверхностного потенциала для рыхлого слоя на $0,2$ – $0,3$ В меньше, чем для основного слоя. Послойное исследование упроченного слоя позволило установить изменение эмиссионных свойств по толщине. Когда интенсивность эмиссии достигала максимума, деформацию прекращали, и наблюдалось затухание эмиссии экзоэлектронов. Для наружного технологического слоя, по сравнению с остальными слоями, измеримое отклонение тока эмиссии от фонового значения регистрируется раньше и при меньшем значении нагрузки, что связано с рыхлой и пористой структурой слоя.

В создаваемых МДО-покрытиях адгезия к подложке сочетается с твердостью, жаропрочность – с электроизоляционными свойствами, износостойкость – с высокими антикоррозионными характеристиками. Технология МДО успешно конкурирует и с другими методами нанесения покрытий и конструкционными материалами. По микромеханическим характеристикам МДО-покрытия на алюминиевых сплавах не уступают твердым сплавам, имеют в 2-3 раза более высокую микротвердость, чем газотермические покрытия, и в 4,5 раза, чем закаленная сталь, износостойкость в 2-2,5 раза выше аналогичного показателя закаленной стали, а адгезия – в 3-4 раза выше, чем при плазменной технологии. Покрытия, полученные на сплавах А1 методом МДО, демонстрируют повышенную стойкость к абразивному износу, сравнимую со стойкостью композитов на основе WC, покрытий, полученных на основе диффузии боридов и корунда [25]. Отметим, что различие в варьировании свойств микродуговых покрытий, выполненных различными исследователями, связано с отличающимися технологическими режимами их получения.

Изучение взаимосвязи «параметры обработки МДО - комплекс функциональных свойств покрытия» для алюминиевых сплавов различных групп и исследование их физико-механических свойств с привлечением физических методов диагностики (экзоэлектронной и акустической эмиссии, контактной разности потенциалов [26]) является базой для дальнейшей разработки практических рекомендаций по определению оптимальных технологических параметров МДО-покрытий с необходимыми характеристиками.

При этом установление существования связей между геометрическими и физическими, механическими и эмиссионными свойствами составляют новый подход в исследовании свойств МДО-покрытий. Предложено метод АЭ и КРП использовать для диагностики и обнаружения дефектов на поверхности МДО-покрытий.

6. Области применения МДО-покрытий

Сочетание высокого уровня ряда характеристик МДО-покрытий, многофункциональности этих покрытий и преимуществ технологии их нанесения определяет возможность применения модифицированных методом МДО деталей в различных отраслях промышленности в самых разных узлах оборудования. Выделим основные направления, где МДО находит широкое применение:

1. Замена тяжелых металлических сплавов или дорогостоящих композитных материалов на легкие металлы (Al, Ti, Mg и их сплавы и др.) с МДО-покрытиями.

2. Нанесение керамических покрытий методом МДО в несколько раз позволяет повысить срок службы деталей, уменьшить производственный брак и время на замену изношенных частей, а также расширить ассортимент предлагаемой высококачественной продукции. Эффективность технологии МДО позволяет рассчитывать на масштабное замещение традиционных технологий обработки поверхности (гальваника, анодирование и др.) на МДО, обеспечивающее более высокие физико-механические характеристики.

3. Технология МДО позволяет восстановить изменившиеся размеры изношенных деталей и значительно повысить долговечность восстановленных деталей машин в современных условиях машиностроительно-го и ремонтного производства.

4. Ввиду широко регулируемой пористости (размеры пор 0,01–10 мкм) путем управления режимами МДО и составами электролитов покрытие может служить матрицей, на которую наносятся полимерные материалы (фторопласты, полиамиды, лаки и т. п.), что в результате позволяет увеличить износостойкость и коррозионную защиту основного материала в десятки раз, а также может служить как подслоем под дальнейшее окрашивание, при этом МДО-покрытие обеспечи-

вает высокопрочное сцепление красителей с поверхностью детали и повышает ее коррозионную стойкость.

В машиностроении наиболее часто МДО-покрытия наносятся на пары трения, подшипники скольжения, зубчатые передачи, поршни, цилиндры, торцевые уплотнения для двигателей внутреннего сгорания, станков и машин различного назначения в судостроении, авиационной промышленности, детали для сельскохозяйственной техники [18, 27-31] и др. Упрочнение деталей цилиндропоршневой группы дает повышение износостойкости в 10-15 раз, снижение механических затрат на 40-50%, массы, материалоемкости и теплонагруженности, повышение КПД на 2-15% [18]. Помимо кратного увеличения износостойкости и наработки на отказ, использование алюминиевых сплавов с МДО-покрытиями существенно улучшает динамические характеристики движущихся деталей узлов (алюминий легче стали почти в 3 раза) [27].

Области применения МДО-покрытий и технологии МДО не ограничиваются приведенными примерами, поскольку возможности метода исследованы еще не полностью, и номенклатура деталей с МДО-покрытиями будет постоянно корректироваться и несомненно расширяться.

7. Выводы

Метод МДО представляет собой качественно новую ступень на пути совершенствования упрочняющей обработки материалов, в процессе которого совмещаются плазменный и электрохимический механизмы формирования оксидного слоя. МДО является гибкой и экологически чистой технологией упрочнения поверхностного слоя вентильных металлов и их сплавов в оксидную керамику с уникальным комплексом свойств, позволяющих использовать изделие в различных отраслях промышленности.

На основе литературных данных и выполненных исследований рассмотрены актуальные вопросы, касающиеся технологии МДО, в дальнейшем планируется разработать практические рекомендации по определению оптимальных технологических параметров МДО для получения покрытий с требуемыми характеристиками и методики контроля многофункциональных МДО-покрытий.

Литература

1. Николаев, А.В. Новое явление в электролизе [Текст] / А.В. Николаев, Г.А. Марков, Б.И. Пешевицкий // Известия СО АН СССР. Серия химических наук. – 1977. – Вып. 5. – № 12. – С. 32-33.
2. А.с. 526961 СССР, МКИ Н 01 G 9/24. Способ формовки анодов электрических конденсаторов [Текст] / Марков Г.А., Маркова Г.В. (СССР). – № 1751524/26-21; заявл. 24.02.72; опубл. 30.08.76, Бюл. № 32.
3. Тихоненко, В.В. Упрочняющие технологии формирования износостойких поверхностных слоев [Текст] / В.В. Тихоненко, А.М. Шкилько // Фізична інженерія поверхні. – 2011. – Т. 9, № 3. – С. 237-243.
4. Шкилько, А.М. Анализ способа упрочнения деталей микродуговым оксидированием [Текст] / А.М. Шкилько, В.В. Тихоненко // Вісник Національного технічного університету „ХПІ”: зб. наук. праць. Тематичний вісник: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2010. – № 46. – С. 252-257.
5. Тимошенко, А. В. Влияние наложенного переменного тока на состав и свойства оксидных покрытий, формируемых в микроплазменном режиме на сплаве Д16 [Текст] / А.В. Тимошенко, Б.К. Опара, Ю.В. Магурова // Защита металлов. – 1994. – Т. 30, № 1. – С. 32 – 38.
6. Микродуговое оксидирование (обзор) [Текст] / И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд, В.Б. Людин и др. // Приборы. – 2001. – № 9. – С. 13-23.

7. Гордиенко, П.С. О кинетике образования МДО-покрытий на сплавах алюминия [Текст] / П.С. Гордиенко, В.С. Руднев // Защита металлов, 1990. – Т. 6, № 3. – С. 467-470.
8. Руднев, В. С. Зависимость толщины покрытия от потенциала МДО [Текст] / П.С. Гордиенко, В.С. Руднев // Защита металлов. 1993. – Т. 29, № 2. – С. 304-307.
9. Ерохин, А.Л. Модель формирования оксидных покрытий при плазменно-электролитическом оксидировании алюминия в растворах силикатов [Текст] / А.Л. Ерохин, В.В. Любимов, Р.В. Ашитков // Физика и химия обработки материалов. – 1996. – №5. – С. 39-44.
10. Микроплазменные электрохимические процессы. Обзор. [Текст] / В.И. Белеванцев, О.П. Терлеева, Г.А. Марков и др. // Защита металлов. – 1998. – Т. 34, № 5. – С. 469-484.
11. Магурова, Ю.В. Влияние катодной составляющей на процесс микроплазменного оксидирования сплавов алюминия переменным током [Текст] / Ю.В. Магурова, А.В. Тимошенко // Защита металлов. – 1995. – Т. 31, № 4. – С. 414 -418.
12. Модельные представления о механизме микродугового оксидирования металлических материалов и управление этим процессом [Текст] / А.Г. Ракоч, В.В. Хохлов, В.А. Баутин и др. // Защита металлов.– 2006.– Т. 42, № 2. – С. 173-184.
13. Черненко, В.И. Получение покрытий анодно-искровым электролизом [Текст] / В.И. Черненко, Л.А. Снежка, И.И. Папанова – Л.: Химия, 1991.– 128с.
14. Саакиян, Л. С. Развитие представлений Г.В. Акимова о поверхностной оксидной пленке и ее влиянии на коррозионно-механическое поведение алюминиевых сплавов [Текст] / Л.С. Саакиян, А. П. Ефремов, А.В. Эпельфельд // Защита металлов. – 2002. – Т. 38, № 2. – С. 186-191.
15. Ракоч, А.Г. Микродуговое оксидирование легких сплавов [Текст] / А.Г. Ракоч, И.В. Бардин // Металлург. – 2010. – № 6. – С. 58-61.
16. Федоров, В. А. Модифицирование микродуговым оксидированием поверхностного слоя деталей [Текст] / В. А. Федоров // Сварочное производство.– 1992.– № 8.– С. 29-30.
17. Богрякова, Е.В. Сравнительный анализ оксидных покрытий на сплавах Д16 при микродуговом и электрохимическом оксидировании [Текст] / Е.В. Богрякова, Е.А. Федорова // Известия вузов. Сер. Химия и химическая технология. – 2007.– Т.50, № 11.– С. 120-121.
18. Белозеров, В.В. Метод микродугового оксидирования и его перспективы [Текст] / В.В. Белозеров, А.И. Махатилова, Е.М. Реброва // Штрипс. – 2008. – № 3. – С. 30-32.
19. Тимошенко, А. В. Влияние силикатных добавок в растворе гидроксида натрия на строение оксидных покрытий, сформированных на сплаве Д16Т в режиме микродугового оксидирования [Текст] / А.В. Тимошенко, С. Гут, Б.К. Опара и др. // Защита металлов.– 1994.– Т. 30, № 2.– С. 175-180.
20. Микродуговое оксидирование (окончание) [Текст] / И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд, В. Б. Людлин и др.// Приборы. – 2001. – № 10. – С. 26-36.
21. Федоров, В. А. Формирование упрочненных поверхностных слоев методом микродугового оксидирования в различных электролитах и при изменении токовых режимов [Текст] / В.А. Федоров, В.В. Белозеров, Н.Д. Великосельская // Физика и химия обработки материалов. – 1991. – № 1. – С. 87-93.
22. Алехин, В.П. Особенности микроструктуры упрочненных слоев, получаемых микродуговым оксидированием [Текст] / В.П. Алехин, В.А. Федоров, С.И. Булычев // Физика и химия обработки материалов. – 1991. – № 5. – С. 121-126.
23. Тихоненко, В.В. Диагностика наружного слоя покрытия, полученного микродуговым оксидированием на сплавах алюминия [Текст] / В.В. Тихоненко, А.М. Шкилько // Вісник Національного технічного університету „ХПІ”: збірник наукових праць. Тематичний випуск „Хімія, хімічна технологія та екологія”. - 2010. - № 47. – С. 119-125.
24. Патент на корисну модель 51613 Україна, МПК G01N 15/08. Спосіб визначення пористості поверхневих шарів твердих тіл [Текст] / Тихоненко В. В., Шкілько А. М., Компанієць І. В.; власник Українська інженерно-педагогічна академія. – № u201000284; заявл.14.01.2010; опублік. 26.07.2010, Бюл. №14.
25. Электролитно-плазменная обработка и нанесение покрытий на металлы и сплавы [Текст] / А.Д. Погребняк, Ю.Н. Тюрин, А.Г. Бойко и др. // Успехи физики металлов. – 2005. – Т. 6. – С. 273-344.
26. Шкилько, А.М. Экзоэмиссионная диагностика поверхности конструкционных материалов: монография [Текст] / А.М. Шкилько. – Харьков: Ноулидж, 2009. – 240 с.
27. Плазменно-электролитическое модифицированное поверхности металлов и сплавов [Текст]: в 2 т. / И.В. Суминов, П. Н. Белкин, А.В. Эпельфельд и др. – М.: Техносфера, 2011. – Т.2. – 512 с.
28. Чиргинова, Н.М. Оксидные керамические покрытия – эффективная тепловая защита рабочих поверхностей ЦПГ [Текст] / Н.М. Чиргинова, В.В. Чиргинов, В.Е. Чиргинов // Автомобильная промышленность. – 2004. – № 6. – С. 30-33.
29. Оксидокерамика на зеркале безгильзового алюминиевого цилиндра ДВС [Текст] / А.И. Комаров, А.М. Гоман, В.И. Комарова и др. // Автомобильная промышленность. – 2005. – № 2. – С. 36 - 40.
30. Кузнецов, Ю.А. Комбинированная технология получения керамических покрытий [Текст] / Ю.А. Кузнецов // Сварочное производство. – 2005. – № 6. – С. 37-39.
31. Коломейченко, А.В. Технология восстановления аргонодуговой наплавкой и упрочнения микродуговым оксидированием деталей из алюминиевых сплавов [Текст] / А.В. Коломейченко // Сварочное производство. – 2004. – № 1. – С. 44-48.