**Влияние самопроизвольного и принудительного затухания микроплазменного разряда на свойства формируемого   
ПЭО-покрытия на сплаве МЛ5**

**Influence of spontaneous and forced attenuation of microplasma discharge on properties PEO coating on alloy ML5**

Козлов И.А. 1; Кулюшина Н.В. 1, к.т.н.; Виноградов С.С. 1, д.т.н.

1*ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации*

***Аннотация:***

Магниевые сплавы, благодаря своим высоким характеристикам удельной прочности, представляют большой интерес для современного авиастроения. Однако на сегодняшний день полностью не решен вопрос их защиты от коррозии. Наиболее перспективным методом защиты магниевых сплавов является плазменное электролитическое оксидирование. В работе исследована возможность повышения защитных свойств плазменного электролитического покрытия на литейном магниевом сплаве МЛ5 путем оптимизации токового режима оксидирования. Электрохимическим методом исследованы покрытия, сформированные при разной очередности следования импульсов поляризующего тока. Представлена рабочая теория формирования плазменного электролитического покрытия на магниевом сплаве МЛ5.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 17.1 «Экологически безопасные, плазменные электролитические покрытия для легких сплавов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»)

***Ключевые слова:***

микродуговое оксидирование, плазменное электролитическое оксидирование, анодное оксидирование, анодно-оксидные покрытия, магниевые сплавы.

***Abstract:***

Magnesium alloys are of great interest for modern aircraft due to its high performance in terms of strength, but today the question of protection against corrosion is not fully resolved. The most promising method of protecting magnesium alloys is plasma electrolytic oxidation. We have investigated the efficiency increase the protective properties of plasma electrolytic coating on the casting magnesium alloy ML5 by optimizing current mode of oxidation. Electrochemical method samples of coating applied using a different sequence of pulses polarizing current. Presents the working theory of the formation of plasma electrolytic coating on magnesium alloy ML5.

***Keywords****:*

microarc oxidation, plasma electrolytic oxidation, anodic oxidation, anode oxide coatings, magnesium alloys.

**Введение**

Роль металлов в качестве основного авиационного материала в ближайшем будущем, очевидно, будет сохраняться, несмотря на увеличение доли композиционных материалов в конструкциях. Необходимо отметить, что в последние десятилетия в современной технике увеличивается количество используемых металлов с высокой удельной прочностью. К таким металлам следует отнести магний [1, 2].

Однако широкое применение магниевых сплавов в конструкции авиационной техники ограничено их низкой коррозионной стойкостью [3]. Для защиты от коррозии деталей и узлов из магниевых сплавов на сегодняшний день в отечественной и зарубежной промышленности в большинстве случаев применяют химическое оксидирование [4, 5] и в значительно меньшей степени электрохимическую обработку поверхности [6–8]. Используемые покрытия обладают низкими защитными свойствами, и в процессе эксплуатации авиационной техники приходится производить многократный ремонт или замену деталей из магниевых сплавов по причине коррозии. Еще одним существенным недостатком традиционных методов нанесения покрытий является высокая токсичность используемых растворов вследствие высоких концентраций химических компонентов электролитов и присутствия соединений хрома. На сегодняшний день иностранные компании начинают применять более перспективные технологии, такие как плазменное электролитическое оксидирование (ПЭО) [9]. ПЭО – метод формирования гетерооксидных покрытий на сплавах, обладающих вентильным эффектом при наложении тока высокой плотности. Данный процесс позволяет формировать твердые покрытия с низкой электропроводностью и повышенными защитными свойствами. Для формирования покрытий методом ПЭО используются низкоконцентрированные растворы, не содержащие токсичных соединений. [10]. Следует отметить, что несмотря на преимущество ПЭО по сравнению с традиционными методами обработки, на начальном этапе своего становления данная технология не получила широкого распространения, в силу необходимости применения энергоемких источников тока. В последующем при развитии метода ПЭО на основании результатов исследований был накоплен большой объем знаний о микроплазменном разряде, что позволило существенно снизить энергоемкость процесса. Так например было установлено, что плазменный разряд зажигается в начальный период поляризации, и его длительность горения не превышает 1–2 мс, поэтому отсутствует необходимость использования более длительных импульсов для зажигания плазменного разряда. Приведенные обстоятельства послужили поводом для совершенствования источников тока, что привело к новым изысканиям в области влияния токовых параметров на ПЭО. Анализ литературных данных показал, что на сегодняшний день в мировом сообществе нет единого понимания о влиянии параметров поляризующего тока на структуру и свойства плазменных электролитических покрытий. [11–13]. В данной работе изучено влияние очередности следования анодной и катодной составляющей импульса поляризующего тока на структуру и защитные свойства покрытия.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 17.1 «Экологически безопасные, плазменные электролитические покрытия для легких сплавов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»)

**Материалы и методы исследования**

Для проведения исследований был выбран литейный магниевый сплав МЛ5.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Марка  сплава | Mg | Al | Zn | Mn | Si | Cu | Fe | Ni | Zr |
| не более | | | | |
| МЛ5 | Основа | 7,5–9 | 0,2–0,8 | 0,15–0,5 | 0,25 | 0,1 | 0,06 | 0,01 | 0,002 |

Перед формированием покрытия поверхность образцов из магниевых сплавов зачищали наждачной бумагой с зернистостью от 400 до 1000, затем протирали ветошью, смоченной в органическом растворителе и травили в растворе 200 г/л гидроокиси натрия в течении 30 минут.

Плазменное электролитическое оксидирование образцов магниевого сплава проводили, используя установку плазменного электролитического оксидирования MicroArc 3.0, позволяющую варьировать сигнал поляризующего тока в широком диапазоне амплитуд, частот и длительности импульсов. В качестве ванны использовалась емкость из нержавеющей стали, оборудованная системой водяного охлаждения, обеспечивающей постоянную температуру водного раствора электролита. Раствор электролита готовили путем последовательного растворения 10 г/л силиката натрия и 7 г/л гидроокиси натрия. Формирование покрытия проводили при значении средней плотности тока 3 А/дм2 и частоте следования импульсов 250 Гц при следовании импульсов по режиму 1 и 2 (рисунок 1). После покрытия подвергали кипячению в воде с целью их уплотнения.

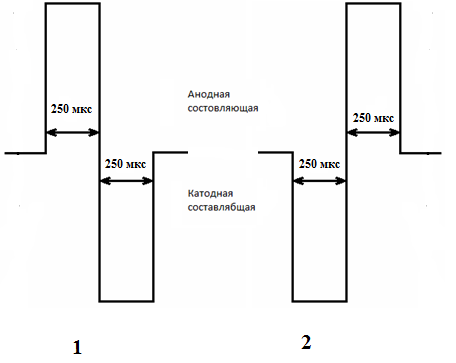


Рис. 1– Формы сигнала поляризующего тока

Толщину покрытия на магниевых сплавах измеряли с помощью переносного электронного толщинометра, состоящего из электронного блока серии MiniTest 2100 и датчика N02, основанного на вихревом принципе, имеющего диапазон измерений 0-100 мкм. Измерения проводили не менее 20 раз на различных участках образца и рассчитывали среднее значение толщины покрытия.

Исследование структуры покрытия проводили на поперечных шлифах образцов с покрытием методом растровой микроскопии на растровом электронном микроскопе JSM-6490LV в режимах вторичных (SEI) и обратноотраженных (BEC или СОМРО) электронов.

Морфологию поверхности ПЭО покрытий исследовали методом конфокальной лазерной сканирующей микроскопия (CLSM) с применением отеческого профилометра S NEOX Sensofar-Tech.

Электрохимические измерения проводили на универсальным потенциостате-гальваностате SI 1287A оборудованным анализатором частотного отклика SI 1260 фирмы «Solartron Mobrey Ltd» в трехэлектродной ячейке Flat Cell Kit Model K0235 («PrincetonAppliedResearch», США) при комнатной температуре в 3 % растворе NaCl. В качестве противоэлектрода использовали платинированную титановую сетку, в качестве электрода сравнения – хлорсеребряный электрод ЭВЛ-1М-2 (ГОСТ 05.2234-77), заполненный насыщенным раствором KCl. Рабочая площадь образца составляла 1 см2. При проведении импедансных измерений использовался синусоидальный сигнал амплитудой 10 мВ и в диапазоне частот от 10-1 Гц до 105 Гц.

**Результаты и обсуждение**

Плазменное электролитическое покрытие, сформированное в силикатно-щелочном электролите на литейном магниевом сплаве МЛ5, представляет собой гетерооксидную структуру состоящую преимущественно из слаборастворимых соединений Mg(OН)2, MgO, Mg2SiO4 [14, 15], что подтверждается результатами рентгеноструктурного фазового анализа. Независимо от режима формирования покрытия имеют одинаковую толщину порядка 27–30 мкм.

Можно предположить, что использование различной формы импульсов поляризующего тока в процессе плазменного электролитического оксидирования, позволит управлять составом и структурой формируемого покрытия.

Как видно из полученных данных (рисунок 2) во всех выбранных режимах обработки формируются покрытия, поверхность которых сильно развита и насыщена микропорами, кроме того видны следы повторного возникновения микроразрядов, имеющих вид оплавленных участков глобулярной формы вокруг поры.

|  |  |
| --- | --- |
| C:\Users\kozlov_ia\AppData\Local\Microsoft\Windows\Temporary Internet Files\Content.Word\ML 5 obrazec 66 0mkm.jpg | C:\Users\kozlov_ia\AppData\Local\Microsoft\Windows\Temporary Internet Files\Content.Word\ML 5 obrazec 64 0mkm.jpg |
| C:\Users\kozlov_ia\AppData\Local\Microsoft\Windows\Temporary Internet Files\Content.Word\ML 5 obrazec 66 -2mkm.jpg | C:\Users\kozlov_ia\AppData\Local\Microsoft\Windows\Temporary Internet Files\Content.Word\ML 5 obrazec 64 -2mkm.jpg |
| C:\Users\kozlov_ia\AppData\Local\Microsoft\Windows\Temporary Internet Files\Content.Word\ML 5 obrazec 66 -4mkm.jpg | C:\Users\kozlov_ia\AppData\Local\Microsoft\Windows\Temporary Internet Files\Content.Word\ML 5 obrazec 64 -4mkm.jpg |
| а | б |

Рис. 2- Морфология поверхности покрытий (а – режим 1, б – режим 2)

Исследование морфологии поверхности образцов с покрытием, полученным по различным режимам плазменного электролитического оксидирования, методом оптического сканирования поверхности и последующим построением трехмерной модели, позволяющей получить представление о характере распространения открытых пор. Такие поры наиболее опасны, с точки зрения коррозионных процессов, так как возможность их запечатывания чрезвычайно мала, а дно пор является самым тонким местом покрытия, куда могут проникнут коррозионно-активные компоненты окружающей среды. Анализ количества и глубины проникновения таких пор проводили путем среза фокальных плоскостей трехмерной модели от «нулевой точки» вглубь покрытия до уровня минус 4 мкм. За нулевую точку принята плоскость трехмерной модели, где наблюдался максимальный процент поверхности, попавший в фокус.

На рисунке 1 представлены срезы (фокальной плоскости) трехмерной модели покрытий, на которых темными точками обозначены раскрытые поры. При изучении нулевого среза и среза при углублении минус 2 мкм видно, что диаметр и количественное соотношение открытых пор одинаково, при срезе на глубину 4 мкм наблюдается уменьшение, как диаметра, так и количества пор покрытия, сформированного по режиму 2, что должно благоприятно сказаться на защитной способности покрытия.

К сожалению, методом сканирования поверхности формируемых покрытий не возможно в полной мере оценить их строение, поэтому были изготовлены поперечные шлифы образцов с покрытием, которые исследовали методом сканирующей электронной микроскопии   
(рисунок 3). Как видно из фотографий поперечного шлифа структура покрытий очень развита с большим количеством скрытых и открытых пор, трещин.

|  |  |
| --- | --- |
| H:\Ilia\N6\0938 x500.jpg | H:\Ilia\N8\0941 x500.jpg |
| F:\статья январь 2015\4KN1\66\torec\0786 x500.jpg | F:\статья январь 2015\4KN1\64\torec\0772 x500.jpg |
| а | б |

Рис. 3 – Структура ПЭО покрытий (а – режим 1, б – режим 2)

В соответствии с литературными данными [16–19] влияние катодной составляющей переменного тока промышленной частоты, так называемого катодного импульса, на формирование покрытий методом ПЭО можно объяснить следующими процессами: образованием высокотемпературных фаз при катодном пробое; образованием дефектов облегчающих анодную поляризацию; образованием избытка водорода, повышающего температуру плазмы при последующем анодном пробое; локальным охлаждением электролита в следствие это промешивания и т.д.

При этом большинство исследователей сходятся во мнении, что рост ПЭО покрытий при катодных пробоях не происходит вследствие образования лавины плазменного разряда от поверхности металла к раствору [20–22]. С учетом данных обстоятельств при проведении оксидирования магниевых сплавов для экономии электроэнергии считается целесообразным проводить ПЭО только в анодном режиме, при этом исключается влияние катодного режима на структуру покрытия.

С учетом фиксируемых осциллографом кривых зависимости тока при нанесении ПЭО покрытий можно заключить, что при использовании первого режима обработки плазменные микроразряды затухают принудительно, второй режим сопровождается естественным затуханием микроразрядов. При естественном затухании микроразрядов системе металл-покрытие-электролит сообщается больше энергии, в результате образуется больше продуктов электрохимической реакции: нерастворимых или малорастворимых оксидов и гидроксидов. При принудительном завершении горения плазменных микроразрядов энергия, передаваемая системе значительно меньше, что приводит к менее интенсивному образованию продуктов электрохимических реакций. Таким образом, покрытие, сформированное по режиму 1, обладает большим количеством открытых пор, в верхней части которых наблюдается оплавление в виде вершины кратера. Покрытие, сформированное по режиму 2 более плотное, его поры в большинстве случаев закрыты, но имеют сквозные каналы малого размера. Независимо от режима формирования, покрытия имеют послойное строение и состоят из верхнего толстого пористого слоя, нижнего (внутреннего) слоя, обладающего значительно меньшей толщиной и пористостью.

На основании результатов исследований ПЭО покрытий методом импедансной спектроскопии для оценки их защитной способности построена эквивалентная электрическая схема системы электролит-покрытие-металл (рисунок 4) и рассчитаны значения модуля импеданса | Z|f = 0,1 Гц, Oм·cм-2 покрытий, сформированных при разных режимах обработки. Дополнительно исследовали влияние последующего наполнения покрытий в кипящей воде на защитные характеристики пленок. Математическое описание экспериментальных электрохимических данных позволяет разделить вклад внешнего и внутреннего слоев покрытия и получить численные характеристики каждого из них [11]. Для лучшего описания поверхностных неоднородностей при расчетах вместо емкостных элементов использовались элементы постоянного сдвига фазы (СРЕ – constant phase elements). Импеданс элемента СРЕ представлен формулой:

*Z*CPE = 1/*Yo*(*jω)n*,

где *j* – мнимая единица, *ω* – угловая частота (*ω* = 2*πf*), *n* и *Y*o – показатель экспоненты и частотно независимый предэкспоненциальный множитель соответственно.

На рисунке 4 схематично изображено ПЭО-покрытие на магниевом сплаве, где С1, R1 и С2, R2 являются элементом постоянного сдвига фазы и сопротивлением внешнего слоя и внутреннего слоя соответственно, Rэ – сопротивление электролита. Сопротивление электролита (Rэ) считали постоянным и равным 30 Oм•cм2. Расчётные параметры элементов ЭЭС для ПЭО покрытия, сформированного на сплаве МЛ5, приведены в таблице 1.

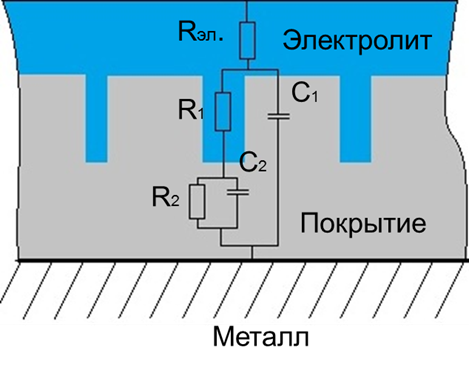


Рис. 4 – Эквивалентная электрическая схема, используемая для моделирования экспериментального импедансного спектра

Таблица 1

Расчетные параметры элементов эквивалентной электрической схемы   
для ПЭО-покрытия

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Режим нанесения | Rэл, Oм·cм2 | CPE1, | | R1,  Oм·cм-2 | CPE2, | | R2, Oм·cм2 | |Z|f = 0,1 Гц,  Oм·cм-2 |
| *Y*o,  См∙см–2·cn | n | *Y*o,  См∙см–2·cn | n |
| Режим 1 Без наполнения | 30 | 3,86\*10-7 | 0,77 | 22 249 | 7,27\*10-6 | 0,67 | 251 510 | 1,37\*105 |
| Режим 2 Без наполнения | 30 | 3,26\*10-7 | 0,82 | 13 664 | 1,77\*10-6 | 0,72 | 237 840 | 0,68\*105 |
| Режим 1 с наполнения в воде | 30 | 2,39\*10-7 | 0,68 | 5 983 | 7,44\*10 | 0,8 | 153 800 | 1,49\*105 |
| Режим 2 с наполнения в воде | 30 | 6,16\*10-7 | 0,73 | 9 281 | 7,6\*10 | 0,8 | 997 250 | 7,4\*105 |

\* |Z|f = 0,1 Гц – модуль импеданса на частоте f = 0,1 Гц

На рисунке 5 представлены диаграмма и Боде исследуемых покрытий. Как видно из данных диаграммы Боде величина |Z| в области низких частот для покрытия 1 больше, чем для покрытия 2, что согласуется с результатами профилометрического исследования покрытия. Таким образом, хорошей защитной способностью обладают пленки, сформированные по первому режиму обработки. После наполнения покрытий в кипящей воде защитная способность пленок, сформированных по второму режиму, увеличивается на один порядок, в отличие от покрытий, полученных по режиму 1, защитные свойства которых после наполнения не изменяются.

На основании рассчитанных значений элементов эквивалентной схемы установлено, что независимо от режима формирования сопротивление верхнего пористого и внутреннего слоев одинаковы для всех покрытий. Однако после наполнения наблюдается снижение сопротивления как внешнего, так и внутреннего слоя покрытия, полученного по режиму 1. Следует отметить, что сопротивление внутреннего слоя пленок, сформированных по режиму 2, после наполнения в кипящей воде возрастает, а сопротивление внешнего слоя – уменьшается. Таким образом, можно предположить, что при формировании покрытий пористый верхний слой заполняется силикатом натрия, который при наполнении пленок в кипящей воде вымывается, поэтому наблюдается уменьшение сопротивления внешнего слоя после наполнения покрытий.

Рис. 5 –Диаграмма Боде для образцов из магниевого сплава МЛ5 с ПЭО покрытием

Значительный рост сопротивления внутреннего слоя при наполнении покрытия, полученного по режиму 2, предположительно связан с образованием в его структуре гидроксида магния по реакции:   
MgO + H2O → Mg(OH)2. Гидроксид магния обладает большим объемом и меньшей растворимостью, по сравнению с оксидом магния, являющимся основным компонентом покрытия, что благоприятно сказывается на защитных характеристиках пленок ПЭО. Аналогичный эффект не наблюдается для покрытия, полученного по режиму 1, что может быть связано с особенностью его формирования.

На основании полученных экспериментальных данных электрохимических исследований, сделано предположение, что при формировании покрытия в режиме 2, сопровождающимся выделением большого количества энергии, в канале самозатухающего микроплазменного анодного разряда образуется больше фазы MgO. В момент прохождения катодного импульса на месте пробоя возникает катодный разряд, в результате действия которого возможно прохождение реакции: Mg2+ + 2OH- → Mg(OH)2. Таким образом, после катодного разряда поры малого размера преимущественно заполняются Mg(OH)2, а поры большего размера заполняются MgO.

В процессе формирования защитного слоя по режиму 1 анодный полупериод ограничен 250 мкс, плазменный разряд затухает принудительно, поэтому не происходит образование должного количества фазы MgO, составляющей основу покрытия.

**Выводы**

Исследование структуры и морфологии поверхности позволили установить различие в покрытиях, полученных при использовании различных режимов поляризующего тока, и выработать рабочую теорию протекания плазменного электролитического оксидирования и структурообразования оксидного покрытия.

На основании данных о строении ПЭО покрытия, формируемого в силикатно-щелочном электролите на магниевом сплаве МЛ5, построена эквивалентная электрическая схема системы электролит-покрытие-металл и произведен расчет экспериментальных электрохимических данных. Оценен вклад внешнего и внутреннего слоев покрытия и получены численные характеристики каждого из них. На основании экспериментальных данных установлено, что наполнение покрытий в кипящей воде благоприятно сказывается на защитных свойствах покрытий ПЭО, сформированных по режиму 2.

Литература

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» //Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33.
2. Корнышева И.С., Волкова Е.Ф., Гончаренко Е.С., Мухина И.Ю. Перспективы применения магниевых и литейных алюминиевых сплавов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 212–221.
3. Каблов Е.Н. Коррозия или жизнь //Наука и жизнь. 2012. №11.   
   С. 16–21.
4. Каримова С.А., Дуюнова В.А., Козлов И.А. Конверсионное покрытие для жаропрочного литейного магниевого сплава МЛ10 //Литейщик России. 2012. №2. С. 26–28.
5. Козлова А.А., Кондрашов Э.К. Системы лакокрасочных покрытий для противокоррозионной защиты магниевых сплавов //Авиационные материалы и технологии. 2014. №2. С. 44–47.
6. [C.S. Wu](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433206011202), [Z. Zhang](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433206011202) , [F.H. Cao](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433206011202), [L.J. Zhang](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433206011202), [J.Q. Zhang](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433206011202), [C.N. Cao](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433206011202). Study on the anodizing of AZ31 magnesium alloys in alkaline borate solutions// [Applied Surface Science](http://www.sciencedirect.com/science/journal/01694332). 2007, [253](http://www.sciencedirect.com/science/journal/01694332/253/8), Pages 3893–3898.
7. [Shuo Sun](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433208002262), [Jianguo Liu](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433208002262) , [Chuanwei Yan](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433208002262), [Fuhui Wang](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433208002262). A novel process for electroless nickel plating on anodized magnesium alloy // [Applied Surface Science](http://www.sciencedirect.com/science/journal/01694332). 2008, 254, Pages 5016–5022.
8. Способ обработки поверхности магниевых сплавов: пат. 2403326 Рос. Федерация; опубл. 28.10.2009 (Каблов Е.Н.)
9. Козлов И.А., Каримова С.А. Коррозия магниевых сплавов и современные методы их защиты //Авиационные материалы и технологии. 2014. №2. С. 8–14.
10. Гнеденков С.В., Сидорова М.В., Синебрюхов С.Л., Антипов В.В., Бузник В.М., Волкова Е.Ф., Сергиенко В.И. Строение и свойства покрытий, полученных методом плазменного электролитического оксидирования на авиационных магниевых сплавах //Авиационные материалы и технологии. 2013. №2. С. 36–45.
11. Guo-Hua Lv, Huan Chen, Wei-Chao Gu, Li Li, Er-Wu Niu, Xian-Hui Zhang, Si-Ze Yang. Effects of current frequency on the structural characteristics and corrosion property of ceramic coatings formed on magnesium alloy by PEO technology // Journal of materials processing technology, 2008, р. 9–13
12. Yanhong Gu, Cheng-fu Chen, Sukumar Bandopadhyay, Chengyun Ning, Yongjun Zhang, Yuanjun Guo. Corrosion mechanism and model of pulsed DC microarc oxidation treated AZ31 alloy in simulated body fluid // Applied Surface Science. 2012, 258, р. 6116– 6126.
13. P. Bala Srinivasan, J. Liang, R.G. Balajeee, C. Blawert, M. Stoёrmer, W. Dietzel. Effect of pulse frequency on the microstructure, phase composition and corrosion performance of a phosphate-based plasma electrolytic oxidation coated AM50 magnesium alloy // Applied Surface Science 2010, 256,   
    р. 3928–3935.
14. Каримова С.А., Козлов И.А., Волков И.А. Повышение защитных свойств неметаллических неорганических покрытий на магниевых сплавах //Труды ВИАМ. 2014. №9. Ст. 09 (viam-works.ru).
15. Козлов И.А., Павловская Т.Г., Волков И.А. Влияние поляризующего тока на свойства плазменного электролитического покрытия для магниевых сплавов системы Mg–Zn–Zr //Авиационные материалы и технологии. 2013. №3. С. 7–12.
16. Марков Г.А., Белеванцев В.И., Терлеева О.П. и др. Износостойкость покрытий, нанесенных анодно-катодным микродуговым методом // Трение и износ. 1988. Т.9. №2. С. 286–290.
17. Терлеева О.П., Белеванцев В.И., Марков Г.А., Слонова А.И., Шулепко Е.К. Электрохимический микроплазменный синтез композиционных покрытий на графите // Физика и химия обработки материалов. 200. №2. С. 35–39.
18. Магурова Ю.В., Тимошенко А.В. Влияние катодной составляющей на процесс микроплазменного оксидирования сплавов алюминия переменным током // Защита металлов. 1995. Т.31. №4. С. 414-418.
19. Sudararajan G., Rama Krishna L., Mechanisms underlying the formation of thick alumina coatings through the MAO coating technology // Surface and Coatings Technology. 2003. V. 167. P. 269–277.
20. Терлеева О.П., Белеванцев В.И., Слонова А.И., Богута Д.Л., Руднев И.С. Сравнительный анализ формирования и некоторых характеристик микроплазменных покрытий на алюминиевом и титановом сплавах // Защита металлов. 2006. Т.42. №2. С. 1–8.
21. Ракоч А.Г., Магурова Ю.В., Бардин И.В., Эльхаг Г.М., Жаринов П.М., Ковалев В.Л. Экзотермическое окисление дна каналов пор при микродуговом оксидировании алюминиевых сплавов // Коррозия. Материалы, защита. 2007. №12. С. 28–33.
22. Ракоч А.Г., Дуб А.В., Бардин И.В., Жаринов П.М., Щедрина И.И., Ковалев В.Л. Влияние катодной составляющей тока на кинетику роста микродуговых покрытий на поверхности алюминиевых сплавов // Коррозия. Материалы, защита. 2008. №11. С. 30–34.