

Аль-Бдейри М.Ш.Х. Обзор методов гальвано-плазменной модификации для производства анодированных покрытий на сплавах алюминия: микроструктура, свойства и применение // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2020. – Т. 22, № 3. – С. 51–59. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.3.07

Al-Budeiri M.S.H. Review of electroplating-plasma modification methods for the production of anodized coatings on aluminum alloys: microstructure, properties and application. *Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science*, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 51–59. DOI: 10.15593/2224-9877/2020.3.07

ВЕСТНИК ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение
Т. 22, № 3, 2020
Bulletin PNRPU. Mechanical engineering, materials science
<http://vestnik.pstu.ru/mm/about/inf/>

DOI: 10.15593/2224-9877/2020.3.07
УДК 62.843.6

М.Ш.Х. Аль-Бдейри

Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Белгород, Россия

**ОБЗОР МЕТОДОВ ГАЛЬВАНО-ПЛАЗМЕННОЙ МОДИФИКАЦИИ
ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА АНОДИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ НА СПЛАВАХ АЛЮМИНИЯ:
МИКРОСТРУКТУРА, СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ**

Легкие металлы, особенно алюминиевые и магниевые сплавы, находят все более широкое применение в электронике, машиностроении, аэрокосмической промышленности, благодаря органичному соотношению прочности, массы, низкой плотности. Эти химически активные металлы имеют и недостаток, выраженный в низкой коррозионной стойкости, поэтому необходимо использовать поверхностные защитные слои, имеющие стойкость к коррозии и износу. Защитные слои возможно получить как за счет анодирования, так и за счет применения гальвано-плазменной модификации. Гальвано-плазменная модификация позволяет наносить на поверхность алюминия и его сплавов оксидный слой, что способствует созданию более твердых, плотных, коррозионно-стойких покрытий. Как и во всех технологиях нанесения покрытия, успешная разработка гальвано-плазменной модификации требует высокой точности, стабильности к предварительной обработке подложки, а также тщательного контроля состояния электролита и технологических параметров процесса. Рассматриваются принципы и процесс нанесения покрытия за счет гальвано-плазменной модификации, включая основы осаждения оксидов, применяемую технологию и типичные характеристики покрытий. Промышленное применение рассматривается одновременно с требованиями к покрытию. Формирование оксидного покрытия методом гальвано-плазменной модификации – это особый и уже достаточно апробированный процесс. Соответствующий контроль состава электролита и условий процесса позволяет применять новейшие виды покрытий, имеющих технологически привлекательные физические и химические свойства. Развитие технологии гальвано-плазменной модификации в течение последнего десятилетия позволяет получить покрытия с контролируемым внешним видом, твердостью, коррозионной стойкостью и трибологическими свойствами для различных отраслей промышленности. Частично рассмотрены покрытия на поверхности алюминиевого сплава АК12ММgH, полученного методом гальвано-плазменной модификации.

Ключевые слова: сплав алюминия, анодирование, гальвано-плазменная модификация, толщина покрытия, обработка поверхности, упрощенные электродные реакции, постоянный ток, электролитическое окисление, волны переменного тока, плазменное электролитическое окисление, оксидные покрытия.

M.S.H. Al-Budeiri

Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation

**REVIEW OF ELECTROPLATING-PLASMA MODIFICATION METHODS
FOR THE PRODUCTION OF ANODIZED COATINGS ON ALUMINUM ALLOYS:
MICROSTRUCTURE, PROPERTIES AND APPLICATION**

Light metals, especially aluminum and magnesium alloys, are increasingly used in electronics, mechanical engineering, and aerospace, due to the organic ratio of strength, mass, and low density. These reactive metals also have the disadvantage of low corrosion resistance, so it is necessary to use surface protective layers that are resistant to corrosion and wear. The protective layers it is possible to obtain as by anodizing and the application of galvanic-plasma modification. Galvano-plasma modification allows applying an oxide layer to the surface of aluminum and its alloys, which contributes to the creation of more solid, dense, corrosion-resistant coatings. As with all coating technologies, the successful development of electroplating modification requires high accuracy, stability to pre-treatment of the substrate, as well as careful monitoring of the electrolyte state and process parameters. The article discusses the principles and process of coating by electroplating, including the basics of oxide deposition, the technology used and typical characteristics of coatings. Industrial applications are considered simultaneously with coating requirements. The formation of an oxide coating by galvano-plasma modification is a special, and already well-tested process. Appropriate control of the electrolyte

composition and process conditions allows the use of the latest types of coatings with technologically attractive physical and chemical properties. The development of electroplating-plasma modification technology over the past decade has made it possible to obtain coatings with a controlled appearance, hardness, corrosion resistance and tribological properties for various industries. Coatings on the surface of the aluminum alloy Ak12mmgn obtained by electroplating modification are partially considered.

Keywords: aluminum alloy, anodizing, electroplated plasma modification, coating thickness, surface treatment, simplified electrode reactions, direct current, electrolytic oxidation, alternating current waves, plasma electrolytic oxidation, oxide coatings.

Существуют различные способы обработки поверхности [1], конверсионные покрытия (например, хроматы, фосфатная или фторидная обработка), лакокрасочные покрытия (включая электрофоретические покрытия), металлические и композитные покрытия и порошковое покрытие (пропитка фторполимером). Анодирование обеспечивает важный диапазон технологий нанесения покрытий, поскольку электролитическое производство тонкой оксидной пленки на металле обеспечивает повышенную электрическую, коррозионную и износостойкость, а также позволяет менять цвета и текстуру поверхности. Оксидная пленка может иметь заметную пористость, но она может быть модифицирована (во время или после анодирования) за счет использования красителей, масел, твердых смазок, поверхностно-активных веществ, ингибиторов коррозии и других модификаторов поверхности. Анодирование традиционно проводится с использованием электролиза постоянного тока [2, 3]. При подключении к положительной клемме источника питания в кислотном электролите заготовка выступает анодом. В качестве кислотного электролита наиболее часто используется серная кислота (H_2SO_4), фосфорная (H_3PO_4), щавелевая ($H_2C_2O_4$), хромовая (H_2CrO_4), а также другие кислоты и их комбинации. За счет использования наиболее оптимального варианта и осуществления контроля над процессом напряжения элемента, состава электролита и условий процесса (включая температуру) можно менять толщину, состав, морфологию и твердость поверхностной оксидной пленки. Как правило, напряжение тока при анодировании составляет от 20 до 80 В, а плотность тока составляет от 1 до 10 А/дм². Анодирование изначально осуществлялось с применением постоянного тока, впоследствии стали использовать и переменный ток

(АС), что позволило получать покрытия с повышенной твердостью, низкой пористостью, более высокой коррозионной стойкостью [4, 5]. Электроплазменное оксидирование с использованием высокого напряжения – недавно разработанный метод в поверхностной инженерии. Электроплазменное оксидирование можно рассматривать как технологию, которая является промежуточной между обычным низковольтным анодированием в водных растворах и плазменным покрытием с высокой энергией (при условии сушки в камере с контролируемым давлением газа). Процесс ГПМ включает в себя: анодный искровой электролиз, анодное окисление под искровым разрядом, микроплазменное анодирование, микродуговое окисление, анодный разряд и анодное искровое осаждение [6]. Формирование покрытий ГПМ включает в себя керамические покрытия. Оксидные покрытия получают анодной поляризацией при высоком напряжении в неагрессивном электролите, в котором может развиваться оксидная пленка. Оксидная пленка может быть легирована элементами электролита. Процессы плазменного электролитического окисления могут происходить при высокой локальной температуре и давлении в каналах разряда. Оксидные покрытия обычно состоят из пористого верхнего слоя, плотного промежуточного слоя и тонкого внутреннего слоя [7].

Технология ГПМ в основном использовалась для обработки алюминиевых сплавов. В табл. 1 приведено сравнение технологии ГПМ и анодирования [8]. Трибологические и антикоррозионные характеристики оксидных покрытий могут улучшаться за счет использования смазок и ингибиторов или химической и электрохимической модификации оксида.

Таблица 1

Сравнительная характеристика традиционной технологии анодирования постоянным током и гальвано-плазменной модификации (ГПМ)

Характеристика	Обычное анодирование DC	Методы ГПМ
Напряжение на клетку, В	20–80	120–300
Плотность тока, А дм ⁻²	<10	<30
Предварительная обработка субстратов	Критическая	Менее критичная
Обычные электролиты	Серная, хромовая или фосфорная кислота	Нейтральный/щелочной, pH 7–12, растворы
Способность покрывать сплавы, содержащие интерметаллиды	Относительно бедная	Улучшенная
Толщина оксида, м	<10	<200
Твердость	Умеренная	Относительно высокая
Адгезия к подложке	Умеренная	Очень высокая
Контроль температуры	Критический	Не столь важно

Явление дугового разряда в водных электролитах было обнаружено еще в 1880-х гг. [9], но детальное исследование не проводилось до 1937 г. [10]. В 1970–1980-х гг. возросло использование ГПМ для создания защитных слоев на алюминиевых сплавах [11–13]. Большая часть новаторских работ по нанесению оксидных покрытий методом ГПМ вентильных металлов были выполнены в России. Международный вклад в технологии ГПМ был сделан в 1970–1980-х гг. В последние два десятилетия ГПМ стал применяться в поверхностной инженерии [14–16]. На текущий момент все больше внимания уделяется снижению веса алюминиевых сплавов, особенно в аэрокосмической промышленности, при сохранении и улучшении свойств. Оксидные покрытия, полученные ГПМ, получают в электролитах за короткое время обработки.

Модели формирования микроарзряда и упрощенные электродные реакции

Предполагается, что во время использования ГПМ возникают различные типы разряда. Исследователи предлагали разные модели для описания образования микроарзряда при использовании ГПМ: электролиз тлеющего разряда [17], электронная лавина [18], электронное туннелирование [19, 20], модель Ерохина и другие [21], что предполагает возможность генерации свободных электронов и зажигания тлеющего разряда в газовых средах на границе раздела оксид–электролит. Тем не менее по-прежнему существуют разногласия по поводу механизмов разряда, поскольку разряды недолговечны, что делает чрезвычайно трудным изучение сложных реакций, включая плазмохимические, термические и анодные процессы окисления, происходящие в разрядах [22]. Основная проблема заключается в том, что предлагаемые модели не объясняют всех характеристик поведения роста покрытий, наблюдаемых при применении ГПМ. В модели разряда, основанной на измерениях оптической эмиссионной спектроскопии [23, 24], идентифицировали элементы, присутствующие в плазме, и оценили температуру плазмы. Впоследствии была предложена модель, в которую включены три различных типа разряда (рис. 1). Разряд В-типа был обусловлен пробоем диэлектрика в сильном электрическом поле, проходящем через оксидный слой. Разряды А- и С-типов были связаны с газовыми разрядами, происходящими в микропорах в оксидной пленке: тип А из поверхностных микропор и тип С из разрядов в относительно глубоких микропорах. Когда напряженность электрического поля достигает критического значения при напряжении пробоя, покрытие

разрушается и образуются каналы разряда, в которых происходят плазменные реакции. Было высказано предположение, что разряды типа В являются интенсивными микроарзрядами, которые обычно происходят на более поздних стадиях процесса, создавая большие всплески на профиле температуры разряда. Это подразумевает, что они имеют более высокую интенсивность, чем разряды типов А и С. Было высказано предположение, что разряды типа В, образующие самые сильные пики сигнала, вероятно, начинались с границы раздела подложки / покрытия. Разряды типа А включают поверхностные разряды в относительно небольших отверстиях вблизи поверхности, а разряды типа С возникают в микропорах в покрытии. Во время этих разрядов температура значительно возрастает до уровня, достаточного для возбуждения частиц, присутствующих в системе. Однако результаты показали, что их интенсивности были намного меньше, чем для разрядов типа В [25]. Температура плазмы оценивалась в диапазоне 4000–10 000 К. Низкотемпературный диапазон соответствовал слабым разрядам, а высокий – сильным [26–29].

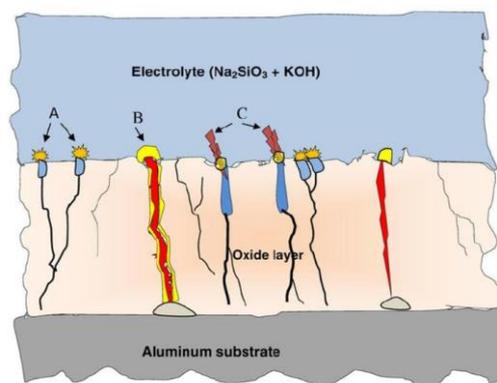
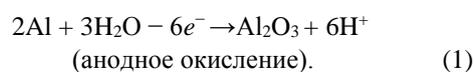


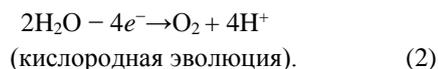
Рис. 1. Принципиальная схема разрядных характеристик при ГПМ алюминиевой подложки (перепечатано с разрешения авторов работы [30])

Покрытия для плазменного электролитического окисления обычно получают с помощью волны переменного тока, содержащей как анодный, так и катодный компонент (рис. 2). Во время анодирования основной реакцией на поверхности заготовки будет образование оксида; в случае использования алюминия реакции могут быть значительно упрощены:

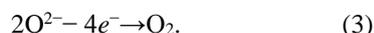


В действительности покрытия содержат гидратированные формы оксидов. При высоких анодных токах, возникающих в ГПМ, также происходит

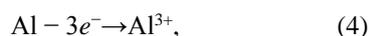
выделение кислорода. Большая часть выделения кислорода происходит через окисление воды.



Кислород также может быть получен за счет восстановления до атомов:



Реакции образования оксида металла (1) и (2) можно считать происходящими посредством анодного растворения металла с образованием соответствующих катионов:



с последующей реакцией между катионом металла и ионами оксида:



На инертном катоде в нейтральных или щелочных электролитах происходит выделение водорода:

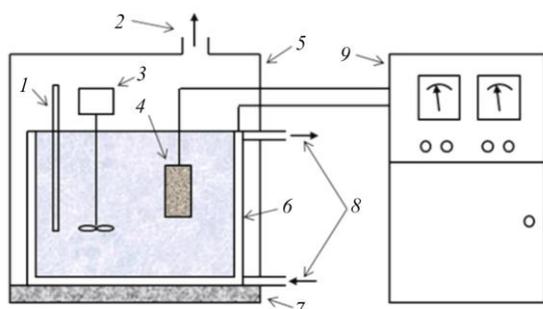
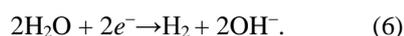


Рис. 2. Типичное расположение оборудования, используемого для покрытия ГПМ:

- 1 – термомпара, 2 – система вытяжки / вентиляции;
- 3 – смеситель; 4 – заготовка (подложка);
- 5 – заземленный корпус; 6 – ванна;
- 7 – изолирующая пластина; 8 – циркуляция потока через систему охлаждения / фильтр; 9 – блок питания

Напряжение на ячейке как функция тока

Соотношение между напряжением элемента и током во время искрового разряда, процесс покрытия ГПМ можно встретить в литературе, описывающей электроды, которые выделяют газ и оксид [31]. При низких напряжениях в реакции преобладают законы Фарадея и Ома (скорости реакции и резистивное падение напряжения соответственно). Однако при превышении критического напряжения другие эффекты становятся важными. Для электрода, выделяющего газ, увеличение напряжения

может привести к колебаниям тока и люминесценции. Резистивный газовый слой (в основном O_2 и H_2) частично экранирует электрод. Напряженность электрического поля становится очень высокой вблизи поверхности электрода, газовая пленка начинает ионизироваться и возникает искрение, сначала в рассеянных пузырьках, а затем в виде равномерного свечения в газовой пленке. Дальнейшее увеличение напряжения приводит к тлеющему разряду, после чего издается интенсивное непрерывное свечение и низкочастотный звук, когда электрод отделяется от объемного электролита изолирующей, полной парогазовой пленкой. Метан образует пассивную пленку. Пассивный слой начинает растворяться, происходит реакция с образованием развивающегося пористого оксидного слоя. Большая часть падения напряжения теперь происходит через эту оксидную пленку. При достаточно высоком напряжении происходит распад пленки и небольшие люминесцентные искры движутся по пленке, которая продолжает расти. При очень высоких напряжениях эффекты термической ионизации сочетаются с существующей искровой ионизацией, происходит значительный дуговой разряд.

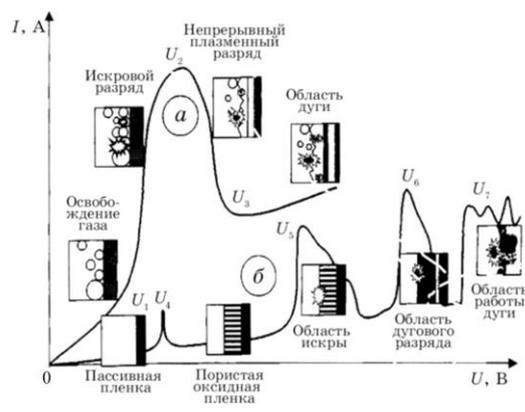


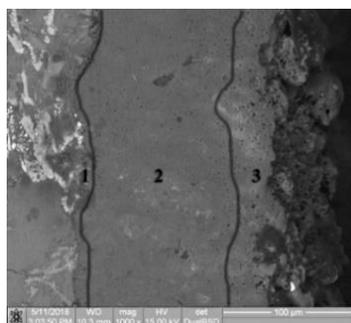
Рис. 3. Вольт-амперная диаграмма процесса ГПМ: а – вокруг электрода; б – внутри диэлектрической пленки на поверхности электрода [32]

В области ГПМ (рис. 3) термическая ионизация частично блокируется накоплением пространственного заряда в загущающей оксидной пленке. Результатом является серия разрядов микродуг, в которых оксидная пленка плавится и включает частицы из электролита. Дальнейшее повышение напряжения свидетельствует о разрядах дуги, которые проникают в металл подложки, происходит разрушительное термическое растрескивание оксидной пленки. Во время ГПМ происходит большое разнообразие типов разряда. Локализованная температура на поверхности металла достигает значений в диапазоне 800–10 000 К, несмотря на то, что

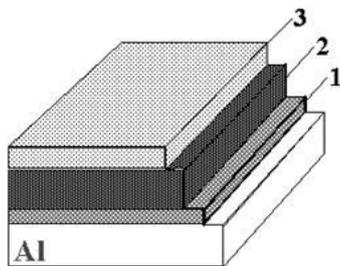
температура объемного электролита часто ограничена, например до 60 °С. Зоны искрового разряда и зоны термического влияния локализованы на металлической поверхности, как правило от 10 до 40 мм соответственно [33].

Свойства и применение ГПМ

Исследования морфологии и состава покрытия проводились с использованием таких методов, как электронная микроскопия в сочетании с энергодисперсионным рентгеновским и рентгеноструктурным анализом (XRD) фазового состава [34]. Большая часть работ касалась подложек из алюминиевых сплавов. Было обнаружено, что при использовании ГПМ покрытия на легких сплавах имеют трехслойную структуру, как показано на рис. 4. Пористый внешний слой оксида (иногда называемый технологическим слоем) состоит из рентгеноаморфных фаз и обогащен алюмосиликатами. Далее находится «функциональный слой». Последний представляет собой более плотный оксид, состоящий из более высоких температурных модификаций, которые имеют максимальную твердость и минимальную пористость. Слой состоит в основном из корунда. Между функциональным слоем и поверхностью металла находится очень тонкий, плотный и сложный оксидный слой («барьерный слой») [35]. Химическая и структурная природа оксидных слоев очень зависит от электролита и условий процесса.



a



б

Рис. 4. ГПМ-покрытие на алюминиевом сплаве: *a* – СЭМ-микрофотография поперечного сечения; *б* – принципиальная схема структуры слоев [5]

При обработке алюминиевых сплавов в силикатно-щелочном электролите на основе Na_2SiO_3 от 2 до 30 г/л и KOH от 2 до 20 г/л происходит образование внутреннего плотного слоя фаз γ - и α - Al_2O_3 с некоторыми сложными (Al–Si–O)-фазами [36]. Существует тенденция к образованию преимущественно α - Al_2O_3 в медьсодержащих алюминиевых сплавах, в то время как γ - Al_2O_3 предпочтительнее для магнийсодержащих алюминиевых сплавов [21].

Морфология поверхности ГПМ также может зависеть от режима приложенного тока. Например, сравнивалось влияние инверсии постоянного тока и тока на ГПМ алюминия, и было показано, что биполярный режим может увеличивать скорость роста оксида. При 20-минутном оксидировании с применением биполярного тока можно получить покрытие толщиной 30 мкм, в то время как в режиме постоянного тока получается слой толщиной 15 мкм. Применение постоянного тока может привести к росту скорости оксида, равной 1–2 мкм / мин [37], тогда как биполярные токи могут достигать 10 мкм / мин [35]. Использование биполярного тока обеспечивает образование более плотной по морфологии поверхности, улучшенную микротвердость, при сравнении с применением постоянного тока [38]. Влияние состава электролита также может влиять на морфологию поверхности [30]. Было исследовано присутствие кремния на подложке Al–Si – при напряжении в ячейке 480 В присутствие кремния привело к увеличению числа мест разряда и шероховатости поверхности. При напряжении ячейки 600 В присутствие кремния, по-видимому, мало влияет на морфологию поверхности и шероховатость. При таких высоких напряжениях в ячейке на состав оксида в основном влиял электролит, а не состав сплава. В других работах исследовалось включение частиц, например, SiO_2 [30] в ГПМ-покрытиях на поверхностях из алюминиевого сплава. Включение частиц изменяет морфологию поверхности, улучшая твердость и уменьшая пористость покрытия.

В табл. 2 представлены варианты применения покрытий, полученных за счет ГПМ, охватывающие аэрокосмическую, строительную, электрическую, биомедицинскую, нефтегазоперерабатывающую, текстильную и спортивную отрасли, а также отрасли досуга. Широкий спектр применения объясняется возможностью получения твердооксидного покрытия на подложке, которое обеспечивает улучшенные химические и физические характеристики.

Таблица 2

Примеры промышленного применения покрытий ГПМ

Сплав	Основной компонент в покрытии ГПМ	Типичная толщина покрытия, мм	Промышленный сектор (продукт)
Al	γ -alumina	30–80	Изготовление (резка / заточка)
Al	γ -alumina	50–100	Аэрокосмическая техника (корпуса клапанов / приводы) [39]
Al–Si	муллита	100–150	Автомобильные двигатели (поршни / гильзы цилиндров)
Al	γ -alumina	30–50	Электронные компоненты (радиаторы / фольга)
Al–Mg	γ -alumina	60–120	Добыча газа и нефти (уплотнения / кольца)
Mg	α -alumina	40–80	Товары для отдыха и спорта (велосипедные рамы)
Ti	TO ₂	4–10	Биомедицинская инженерия (хирургическая фиксация)
Stainless steel	γ -alumina	40–50	Вакуумная техника (насосные роторы и клапаны)

Выводы

1. Была кратко рассмотрена разработка ГПМ из легких металлических сплавов.

2. Плазменное электролитическое оксидирование является специализированной техникой анодирования, которая использовалась для ряда металлических вентильных сплавов, включая алюминий и магний. Оксидные покрытия с контролируемой пористостью могут быть получены методом электролиза переменного тока, который включает образование микродуг на заготовке в условиях погружения в раствор электролита.

3. При достаточно длительном времени осаждения оксидные пленки имеют duplexную структуру с внешним рыхлым («технологическим»

слоем и твердым, плотным внутренним «функциональным» слоем.

4. Важные технологические параметры покрытия ГПМ на магнии включают состав электролита, температуру, плотность тока, а также напряжение элемента и время осаждения. Базовый процесс ГПМ может быть модифицирован несколькими способами для получения покрытий следующего поколения на магниевых сплавах и других легких металлах. Примеры включают в себя:

– включение сульфидов молибдена, 80 PTFE (технология контролируемой дисперсии поверхностно-активного вещества 81, используемая в композиционных покрытиях, 82 для контроля трибологии);

– использование частоты, амплитуды и симметрии контролируемых форм сигналов, используемых при импульсном электроосаждении;

– сочетание химической, механической и электрохимической обработки поверхности для получения композиционно-модулированных покрытий, имеющих контролируемые градиенты физических свойств.

Список литературы

1. Колесов Э. Трибомодифицирование поверхностей трения с целью повышения их износостойкости: магистерская дис. / Полоц. гос. ун-т. – Полоцк, 2018. – 57 с.
2. Иванов В.П., Вигерина Т.В. Определение остаточного ресурса автомобильных агрегатов // Вестник Брест. гос. техн. ун-та. – 2018. – № 4. – С. 60–64.
3. Особенности электролитно-плазменного травления жаростойких покрытий с поверхности деталей из жаропрочных никелевых сплавов / С. Попова, С. Мубо-яджан, С. Будиновский, Д.В. Добрынин // Тр. ВИАМ. – 2016. – № 2 (38). – С. 32–38.
4. Микродуговые биопокрытия на основе фосфатов кальция с добавлением лантана и кремния / Е. Комарова, М.Б. Седельникова, Ю.П. Шаркеев, М. Чайкина, В. Шейкин, Е. Шелехова, Е. Казанцева // Новые технологии создания и применения биокерамики в восстановительной медицине: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., г. Томск, 13–15 октября 2016 г. – Томск, 2016. – С. 55–62.
5. Исследование коррозионной стойкости изделий из алюминиевых сплавов с защитными покрытиями, сформированными плазменным электролитическим оксидированием / А.В. Коломейченко, Н.С. Чернышов, Н.В. Титов, В.Н. Логачев // Электронная обработка материалов. – 2016. – Т. 52, № 6. – С. 25–29.
6. Федоров В., Великосельская Н. Влияние микродугового оксидирования на износостойкость алюминиевых сплавов // Трение и износ. – 1989. – Т. 10, № 3. – С. 521–524.
7. Malyshev V.N. Modification of friction knots work surfaces on the basis of microarc oxidation method // Int. J. Sci. Res. in Sci., Eng. and Techn. (IJSRSET). – 2016. – Vol. 2, no 6. – P. 464–480.

8. Глущенко А., Хохлов А. Повышение технико-эксплуатационных показателей ДВС методом микро-дугового оксидирования днищ поршней / УЛГУ. – Ульяновск, 2015. – 112 с.
9. Трушкина Т.В., Михеев А.Е., Гирн А.В. Коррозионная стойкость МДО покрытий в агрессивных средах // Сиб. журн. науки и технологий. – 2014. – № 1 (53). – С. 179–184.
10. Соколов Ю., Кукареко В., Паршуту А. Исследование оксидных пленок, полученных методом высоко-вольтового электрохимического оксидирования // Металлургия: республикан. межвед. сб. науч. тр. / БНТУ. – Минск, 2014. – Вып. 35. – С. 199–207.
11. Влияние режимов микродугового оксидирования на коррозионные свойства Al–Si сплава / С.К. Киселева, Л.И. Зайнуллина, М.М. Абрамова, Н.Ю. Дударева, И.В. Александров // Вестник Иркут. гос. техн. ун-та. – 2014. – № 9 (92). – С. 181–185.
12. Пылев В., Белогуб А., Ободец Д. Прогнозирование ресурсной прочности поршня легкомоторного авиационного двигателя // Авиационно-космическая техника и технология. – 2013. – № 9. – С. 177–182.
13. Peng Z. Plasma electrolytic oxidation (PEO) coatings on an A356 alloy for improved corrosion and wear resistance / University of Windsor. – Windsor, 2013. – 113 p.
14. Henley V. Anodic oxidation of aluminium and its alloys: the pergamon materials engineering practice series. – N.Y.: Pergamon Press, 2013. – 180 p.
15. Тихоненко В., Шкилько А. Метод микродугового оксидирования // Вост.-Европ. журн. передовых техн. – 2012. – Т. 2, № 13. – С. 13–18.
16. Effects of frequency on growth process of plasma electrolytic oxidation coating / X. Zhang, Y. Zhang, L. Chang, Z. Jiang, Z. Yao, X. Liu // Materials Chem. and Phys. – 2012. – Vol. 132, no. 2–3. – P. 909–915.
17. Коваленко С.Ю., Казаков А.В. Методика оценки приспособленности автомобильных двигателей к режиму пуска // Вестник Оренбург. ун-та. – 2011. – № 10(129). – С. 165–170.
18. Механические свойства и эрозийная стойкость вакуумно-дуговых покрытий (Ti, Al) N, модифицированных иттрием / В. Васильев, В. Коваленко, А. Лучанинов, В. Маринин, Е. Решетняк, В. Стрельницкий, Г. Толмачева // Вопросы атомной науки и техники. – 2011. – № 4. – С. 160–164.
19. Малоземов А.А., Шикин А.С. Расчетно-экспериментальная оценка влияния уровня деформирования на ресурс конвертированного дизеля типа В-2 // Вестник Юж.-Урал. гос. ун-та. Машиностроение. – 2009. – № 33(166). – С. 51–56.
20. Колчин А.И., Демидов В.П. Расчет автомобильных и тракторных двигателей. – М.: Высш. шк., 2008. – 496 с.
21. Goodman J. Nikasil and Alusil // Engine Professional. – 2008. – Vol. 1, no 4. – P. 18–22.
22. Species separation during coating growth on aluminium by spark anodizing / F. Monfort, E. Matykina, A. Berkani, P. Skeldon, G. Thompson, H. Habazaki, K. Shimizu // Surf. and Coat. Techn. – 2007. – Vol. 201, no 21. – P. 8671–8676.
23. Электролитно-плазменная обработка и нанесение покрытий на металлы и сплавы / А. Погребняк, Ю. Тюрин, А. Бойко, М. Жадкевич, М. Кальшканов, Ш. Рузимов // Успехи физики металлов. – 2005. – Т. 6, № 4. – С. 273–344.
24. Potential applications of pulse electrical discharges in water / P. Sunka, V. Babicky, M. Clupek, M. Fuciman, P. Lukes, M. Simek, J. Benes, V. Locke, Z. Maicherova // Acta Physica Slovaca. – 2004. – Vol. 54, no 2. – P. 135–145.
25. Основы трибологии (Трение, износ, смазка): учеб. для техн. вузов / А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун, Н.А. Буше [и др.]; под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2001. – 663 с.
26. Микродуговое оксидирование (обзор) / И. Суминов, А. Эпельфельд, В. Людин, А. Борисов, Б. Крит // Приборы. – 2001. – № 9. – С. 13.
27. Современные технологии модификации поверхности материалов и нанесения защитных покрытий: в 3 т. Т. I. Микродуговое оксидирование / А.В. Эпельфельд, П.Н. Белкин, А.М. Борисов, В.А. Васин, Б.Л. Крит, В.Б. Людин, О.В. Сомов, В.А. Сорокин, И.В. Суминов, В.П. Францкевич. – М.: СПб.: Реноме, 2017. – 648 с.
28. Современные технологии модификации поверхности материалов и нанесения защитных покрытий: в 3 т. Т. II. Электрохимико-термическая обработка металлов и сплавов / П.Н. Белкин, А.М. Борисов, В.А. Васин, Б.Л. Крит, В.Б. Людин, О.В. Сомов, В.А. Сорокин, И.В. Суминов, В.П. Францкевич, А.В. Эпельфельд. – М.: СПб.: Реноме, 2017. – 520 с.
29. Современные технологии модификации поверхности материалов и нанесения защитных покрытий: в 3 т. Т. III. Комбинированные технологии обработки материалов и нанесения защитных покрытий / И.В. Суминов, П.Н. Белкин, А.М. Борисов, В.А. Васин, Б.Л. Крит, В.Б. Людин, О.В. Сомов, В.А. Сорокин, В.П. Францкевич, А.В. Эпельфельд. – М.: СПб.: Реноме, 2017. – 400 с.
30. Кинетика изнашивания покрытий, нанесенных методом микродугового оксидирования / А. Петросянц, В. Малышев, В. Федоров, Г. Марков // Трение и износ. – 1984. – Т. 5, № 2. – С. 350–354.
31. The electrodeposition of composite coatings based on metal matrix-included particle deposits / C. Kerr, D. Barker, F. Walsh, J. Archer // Transact. of the Inst. of Metal Finish. – 2000. – Vol. 78, no 5. – P. 171–178.
32. Поляк М.С. Технология упрочнения. – М.: Л.В.М. – СКРИПТ: Машиностроение, 1995. – 832 с.
33. Plasma electrolysis for surface engineering / A. Yerokhin, X. Nie, A. Leyland, A. Matthews, S. Dowey // Surf. and Coat. Techn. – 1999. – Vol. 122, no 2–3. – P. 73–93.
34. The surface treatment and finishing of aluminum and its alloys / S. Wernick, R. Pinner, P.G. Sheasby, R. Pinner, P.G. Sheasby // 5th ed ASM International. – 1987. – 1350 p.
35. Федоров В., Великосельская Н. Взаимосвязь фазового состава и свойств упрочненного слоя, получаемого

при микродуговом оксидировании алюминиевых сплавов // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1991. – № 3. – С. 29–30.

36. Трение и теплопередача в поршневых кольцах двигателей внутреннего сгорания / М. Петриченко, Р. Петриченко, А. Канищев, А. Шабанов. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1990. – 248 с.

37. Износостойкость покрытий, нанесенных анодно-катодным микродуговым методом / Г. Марков, В. Белеванцев, О. Терлеева, Е. Шулепко, В. Кириллов // Трение и износ. – 1988. – Т. 9, № 2. – С. 286–290.

38. Кондратьев Н. Отказы и дефекты судовых дизелей. – М.: Транспорт, 1985. – 152 с.

39. Конструирование двигателей внутреннего сгорания: учеб. для студ. вузов / Н.Д. Чайнов, Н.А. Иващенко, А.Н. Краснокутский, Л.Л. Мягков; под ред. Н.Д. Чайнова. – 2-е изд. – М.: Машиностроение, 2011. – 496 с.

References

1. Kolesov E. Tribomodifitsirovanie poverkhnostei treniia s tsel'iu povysheniia ikh iznosostoikosti: magisterskaia dissertatsiya [Tribomodification of friction surfaces to increase their durability: master's dissertatsiya]. Polotsky State University, 2018, 57 p.

2. Ivanov V.P., Vigerina T.V. Opredelenie ostatnochnogo resursa avtomobil'nykh agregatov [Determining the residual resource of car units]. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2018, no. 4, pp. 60–64.

3. Popova S., Muboiadzhian S., Budinovskii S., Dobrynin D.A. Osobennosti elektrolitno-plazmennogo travleniia zharostoikikh pokrytii s poverkhnosti detalei iz zharoprochnykh nikel'nykh spлавov [Features of electrolyte-plasma etching of heat-resistant coatings from the surface of parts from heat-resistant nickel alloys]. *Trudy VIAM*, 2016, no 2(38), pp. 32–38.

4. Komarova E., Sedel'nikova M.B., Sharkeev Yu.P., Chaikina M., Sheikin V., Shelekhova E., Kazantseva E. Mikrodogovye biopokrytiia na osnove fosfatov kal'tsiia s dobavleniem lantana i kremniia [Microdug biop coverings based on calcium phosphates with the addition of lanthan and silicon]. *Novye tekhnologii sozdaniia i primeneniia biokeramiki v vostanoviteli'noi meditsine: materialy 4-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, 13–15 oktyabrya 2016*, Tomsk, 2016. pp. 55–62.

5. Kolomeichenko A.V., Chernyshov N.S., Titov N.V., Logachev V.N. Issledovanie korrozionnoi stoikosti izdelii iz aluminievnykh spлавov s zashchitnymi pokrytiiami, sformirovannymi plazmennym elektroliticheskim oksidirovaniem [Study of corrosive resistance of aluminum alloys with protective coatings formed by plasma electrolytic oxidation]. *Elektronnaia obrabotka materialov*, 2016, vol. 52, no 6, pp. 25–29.

6. Fedorov V., Velikosel'skaia N. Vliianie mikrodogovogo oksidirovaniia na iznosostoikost' aluminievnykh spлавov [Effect of microdug oxidation on the durability of aluminum alloys]. *Trenie i iznos*, 1989, vol. 10, no. 3, pp. 521–524.

7. Malyshev V.N. Modification of friction knots work surfaces on the basis of microarc oxidation method, *Intern. J.*

Scientific Research in Science, Engineering and Technology (IJSRSET), 2016, vol. 2, no 4, pp. 464–480.

8. Glushchenko A., Khokhlov A. Povyseniie tekhnikoeksploatatsionnykh pokazatelei DVS metodom mikrodogovogo oksidirovaniia dnishch porshnei [Improving the feasibility indicators of DVS by microdug oxidation of the bottoms of pistons]. Ul'ianovsk: UIGU, 2015, 112 p.

9. Trushkina T.V., Mikheev A.E., Girn A.V. Korrozionnaia stoikost' MdO pokrytii v agressivnykh sredakh [Corrosive resistance of MDO coatings in aggressive environments], *Sibirskii zhurn. nauki i tekhnologii*, 2014, no 1(53), pp. 179–184.

10. Sokolov Yu., Kukareko V., Parshuto A. Issledovanie oksidnykh plenok, poluchennykh metodom vysokovol'tnogo elektrokhimicheskogo oksidirovaniia [Study of oxide films obtained by high-voltage electrochemical oxidation]. *Metallurgii: respublikanskii mezhvedomstvennyi sbornik nauchnykh trudov*, Vyp. 35, Minsk: BNTU, 2014, pp. 199–207.

11. Kiseleva S.K., Zainullina L.I., Abramova M.M., Dudareva N.Yu., Aleksandrov I.V. Vliianie rezhimov mikrodogovogo oksidirovaniia na korrozionnye svoistva Al-Si сплава [Effect of microdug oxidation regimes on the corrosive properties of Al-Si alloy]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2014, no 9(92), pp. 181–185.

12. Pylev V., Belogub A., Obodets D. Prognozirovaniie resursnoi prochnosti porshnia legkomotornogo aviatsionnogo dvigatel'ia [Predicting the resource strength of a light-engine piston]. *Aviatsionno-kosmicheskaiia tekhnika i tekhnologii*, 2013, no 9, pp. 177–182.

13. Peng Z. Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) Coatings on an A356 Alloy for Improved Corrosion and Wear Resistance. University of Windsor, 2013, 113 p.

14. Henley V. Anodic Oxidation of Aluminium and Its Alloys: The Pergamon Materials Engineering Practice Series. New York: Pergamon Press, 2013, 180 p.

15. Tikhonenko V., Shkil'ko A. Metod mikrodogovogo oksidirovaniia [Microdug oxidation method]. *Vostochno-Evropeskii zhurnal peredovykh tekhnologii*, 2012, vol. 2, no, 13, pp. 13–18.

16. Zhang X., Zhang Y., Chang L., Jiang Z., Yao Z., Liu X. Effects of frequency on growth process of plasma electrolytic oxidation coating. *Materials Chemistry and Physics*, 2012, vol. 132, no 2–3, pp. 909–915.

17. Kovalenko S.Yu., Kazakov A.V. Metodika otsenki prisposoblennosti avtomobil'nykh dvigatelei k rezhimu puska [The method of assessing the fitness of car engines to the start-up mode]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2011, no. 10(129), pp. 165–170.

18. Vasil'ev V., Kovalenko V., Luchaninov A., Marinin V., Reshetniak E., Strel'nikskii V., Tolmacheva G. Mekhanicheskie svoistva i erozionnaia stoikost' vakuumnodugovykh pokrytii (Ti, Al) N, modifitsirovannykh ittriem [Mechanical properties and erosive resistance of vacuum-arc coatings (Ti, Al)N, modified itrim]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki*, 2011, no. 4, pp. 160–164.

19. Malozemov A.A., Shikin A.S. Raschetno-eksperimental'naia otsenka vliianiia urovnia deforsirovaniia na resurs konvertirovannogo dizelia tipa V-2 [Calculating and

experimental assessment of the impact of deforceration on the B-2 converted diesel resource]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroenie*, 2009, no. 33(166), pp. 51–56.

20. Kolchin A.I., Demidov V.P. *Raschet avtomobil'nykh i traktornykh dvigatelei*, 4nd. Moscow: Vysshaya shkola, 2008, 496 p.

21. Goodman J. Nikasil and Alusil. *Engine Professional*, 2008, pp. 18–22.

22. Monfort F., Matykina E., Berkani A., Skeldon P., Thompson G., Habazaki H., Shimizu K. Species separation during coating growth on aluminium by spark anodizing. *Surface and Coatings Technology*, 2007, vol. 201, iss. 21, pp. 8671–8676.

23. Pogrebniak A., Tiurin Yu., Boiko A., Zhadkevich M., Kalyshekanov M., Ruzimov Sh. Elektrolitno-plazmennaya obrabotka i nanesenie pokrytii na metally i splavy [Electrolyte-plasma treatment and coating of metals and alloys]. *Uspekhi fiziki metallov*, 2005, vol. 6, no. 4, pp. 273–344.

24. Sunka P., Babicky V., Clupek M., Fuciman M., Lukes P., Simek M., Benes J., Locke B., Maicherova Z. Potential applications of pulse electrical discharges in water. *Acta Physica Slovaca*, 2004, vol. 54, iss. 2, pp. 135–145.

25. Chichinadze A., Braun E., Bushe N. Osnovy tribologii (trenie, iznos, smazka): uchebnik dlia tekhnicheskikh vuzov [Basics of tribology (friction, wear, lubrication)]. 2nd. Ed. A.V. Chichinadz. Moscow: Mashinostroenie, 2001, 664 p.

26. Suminov I., Epel'fel'd A., Liudin V., Borisov A., Krit B. Mikrodugovoe oksidirovanie (obzor) [Microdugum oxidation (review)]. *Pribory*, 2001, no. 9, pp. 13–23; no. 10, pp. 26–36.

27. Sovremennye tekhnologii modifikatsii poverkhnosti materialov i naneseniia zashchitnykh pokrytii. V 3 t. Moscow; Saint Petersburg: Renome, 2017, vol. 1: Mikrodugovoe oksidirovanie [Microdugum oxidation]. Epel'fel'd A.V., Belkin P.N., Borisov A.M., Vasin V.A., Krit B.L., Liudin V.B., Somov O.V., Sorokin V.A., Suminov I.V., Frantskevich V.P., 648 p.

28. Sovremennye tekhnologii modifikatsii poverkhnosti materialov i naneseniia zashchitnykh pokrytii: v 3 tomakh [Modern technologies of materials surface modification and protective coatings application]. Vol. II. Elektrokhimiko-termicheskaiia obrabotka metallov i splavov. P.N. Belkin, A.M. Borisov, V.A. Vasin, B.L. Krit, V.B. Liudin, O.V. Somov, V.A. Sorokin, I.V. Suminov, V.P. Frantskevich, A.V. Epel'fel'd. Moscow; Saint-Petersburg: Renome, 2017, 520 p.

29. Sovremennye tekhnologii modifikatsii poverkhnosti materialov i naneseniia zashchitnykh pokrytii: v 3 tomakh [Modern technologies of materials surface modification and protective coatings application]. Vol. III. Kombinirovannye tekhnologii obrabotki materialov i naneseniia zashchitnykh pokrytii. I.V. Suminov, P.N. Belkin, A.M. Borisov, V.A. Vasin, B.L. Krit, V.B. Liudin, O.V. Somov, V.A. Sorokin, V.P. Frantskevich, A.V. Epel'fel'd. Moscow; Saint-Petersburg: Renome, 2017. – 400 s.

30. Petrosiants A., Malyshev V., Fedorov V., Markov G. Kinetika iznashivaniia pokrytii, nanesennykh metodom mikrodugovogo oksidirovaniia [Kinetics of coatings applied by microdugum oxidation]. *Trenie i iznos*, 1984, vol. 5, no. 2, pp. 350–354.

31. Kerr C., Barker D., Walsh F., Archer J. The electro-deposition of composite coatings based on metal matrix-included particle deposits. *Trans. Institute of Metal Finishing*, 2000, vol. 78, iss. 5, pp. 171–178.

32. Poliak M.S. *Tekhnologiia uprochneniia*, [Hardening technology]. Moscow: L.V.M. SKRIPT; Mashinostroenie, 1995, 832 p.

33. Yerokhin A., Nie X., Leyland A., Matthews A., Dowe S. Plasma electrolysis for surface engineering. *Surface, and Coatings Technology*, 1999, vol. 122, iss. 2–3, pp. 73–93.

34. Wernick S., Pinner R., Sheasby P.G. The surface treatment and finishing of aluminum and its alloys. 5nd., 2 vol. *ASM International*, 1987, 1350 p.

35. Fedorov V., Velikosel'skaia N. Vzaimosviaz' fazovogo sostava i svoistv uprochnennogo sloia, poluchaemogo pri mikrodugovom oksidirovanii aluminievnykh splavov [Relationship of phase composition and properties of hardened layer obtained by microdugum oxideing of aluminum alloys]. *Khimicheskoe i neftianoe mashinostroenie*, 1991, no. 3, pp. 29–30.

36. Petrichenko M., Petrichenko R., Kanishchev A., Shabanov A. *Trenie i teploperedacha v porshnevnykh kol'tsakh dvigatelei vnutrennego sgoraniia*, [Friction and heat transfer in piston rings of internal combustion engines]. Leningrad: Izdatelstvo LGU, 1990, 248 p.

37. Markov G., Belevantsev V., Terleeva O., Shulepko E., Kirillov V. Iznosostoičnost' pokrytii, nanesennykh anodno-katodnym mikrodugovym metodom [The durability of coatings applied by anode-cathode microdugum method]. *Trenie i iznos*, 1988, vol. 9, no. 2, pp. 286–290.

38. Kondrat'ev N. Otkazy i defekty sudovykh dizelei. Moscow: Transport, 1985, 152 p.

39. Chainov N., Ivashchenko N., Krasnokutskii A., Migakov L. Konstruirovaniye dvigatelei vnutrennego sgoraniia: uchebnik [Construction of internal combustion engines]. 2nd. Moscow: Mashinostroenie, 2011, 496 p.

Получено 15.05.2020

Опубликовано 12.10.1010

Сведения об авторе

Аль-Бдейри Махмуд Шакир (Белгород, Россия) – аспирант кафедры материаловедения и нанотехнологий Белгородского государственного национального исследовательского университета, e-mail: albdeyri@bk.ru.

About the authors

Al-Bdeiri Mahmud Shakir (Belgorod, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Materials Science and Nanotechnology, Belgorod State National Research University, e-mail: albdeyri@bk.ru.