Высокоэффективное формирование защитных композиционных покрытий, модифицированных графитом, на легких сплавах

А. С. Шатров[a], В. Н. Кокарев[b,*]

[a] *Россия, Москва, 111396, пр. Союзный, д. 15, к. 2, кв. 156*
[b] *Россия, Москва, 119619, ул. Нарофоминская, д. 13, кв. 27*
[*] *e-mail: v-kokarev@bk.ru*

Поступила в редакцию 23.06.2025
После доработки 20.11.2025
Принята к публикации 23.11.2025

Разработан эффективный одностадийный способ формирования на легких сплавах (Al, Mg, Ti) защитных композиционных графитокерамических покрытий. Способ включает в себя одновременно высокочастотное плазменное электролитическое оксидирование (ПЭО) и модификацию покрытия графитом, образующимся в электролите за счет отделения дисперсных частиц от графитовых противоэлектродов под воздействием плазменных разрядов и электроэрозии. Исследования защитных композиционных ПЭО-покрытий, полученных предлагаемым способом, показали, что они существенно превосходят по своим эксплуатационным свойствам базовые ПЭО-покрытия, не модифицированные графитом. По сравнению с базовыми композиционные ПЭО-покрытия обладали на 10% большей микротвердостью, на 1–2 порядка увеличенным сопротивлением износу, втрое более низким коэффициентом трения и вдвое более высокой коррозионной стойкостью. Композиционные ПЭО-покрытия также имели гидрофобные свойства. Предлагаемый способ формирования покрытий высокотехнологичен, предельно прост и позволяет значительно сократить затраты труда, материалов и энергии.

Ключевые слова: плазменное электролитическое оксидирование, защитные покрытия, композиционные покрытия, дисперсный графит, износостойкость, коррозионная стойкость, легкие сплавы

УДК 669.2.017.620.17, 669.2.017.620.18
https://doi.org/10.52577/eom.2025.61.6.10

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время метод плазменного электролитического оксидирования (ПЭО) является одним из самых перспективных способов поверхностной обработки легких сплавов (Al, Mg, Ti). Формируемые в процессе ПЭО оксидно-керамические покрытия обладают высокой твердостью, прочностью, диэлектрическими свойствами [1–7].

Несмотря на все возрастающий интерес к методу ПЭО, его возможности используются далеко не полностью. Широкому применению метода ПЭО в промышленном масштабе препятствуют в основном две актуальные проблемы. Первой проблемой является относительно низкая производительность стандартного процесса ПЭО на промышленной частоте. В условиях современной экономики предъявляются все более высокие требования к производительности технологических процессов и снижению эксплуатационных затрат. Кроме того, ПЭО является высокоэнергетическим процессом, поэтому важнейшей экономической задачей стало получение высококачественных ПЭО-покрытий с минимальными затратами времени и энергии.

Второй проблемой, сдерживающей широкое применение ПЭО в промышленности и тесно связанной с первой, является ограниченность сферы применения метода. Сами по себе ПЭО-покрытия обладают высоким коэффициентом трения (0,4–0,75), поэтому не могут быть использованы в деталях трибоузлов, подвижных соединений и т.п. Эта проблема решается с помощью разработки композиционных ПЭО-покрытий с функциональными свойствами, в частности покрытий с низким коэффициентом трения, высокой износо- и коррозионной стойкостью. Такие ПЭО-покрытия могут работать в трибопарах, эксплуатируемых в условиях граничного трения и в агрессивных средах. Это существенно расширит области применения метода ПЭО.

Но получение композиционных ПЭО-покрытий зачастую связано с применением целого ряда дополнительных технологических операций, что осложняет и удорожает процесс. Таким образом, другой важнейшей задачей

является упрощение процесса получения композиционных покрытий, создание одностадийных процессов с использованием дешевых материалов.

На практике композиционные покрытия на основе ПЭО создаются за счет модификации ПЭО-покрытий путем добавления мелкодисперсных специальных материалов [8, 9]. Для получения антифрикционных ПЭО-покрытий обычно используются микрочастицы политетрафторэтилена (ПТФЭ) [10–12], графита [8, 10, 13–15], дисульфида молибдена [16, 17].

Наиболее распространен способ получения композиционных полимерно-оксидных покрытий, когда пористая структура предварительно сформированного ПЭО-покрытия пропитывается в суспензии, содержащей частицы ПТФЭ, а затем подвергается термообработке [11, 13]. Такие покрытия обладают высокими антифрикционными и антикоррозионными свойствами. Но этот способ весьма трудоемок, связан с большим количеством технологических операций и используемого оборудования, что существенно снижает эффективность его применения.

С технологической точки зрения актуально развитие одностадийных процессов, то есть формирование композиционных покрытий непосредственно при ПЭО-обработке. Это процессы, основанные на использовании электролитов-суспензий, когда в базовый электролит для ПЭО добавляют порошковые дисперсные материалы, которые участвуют в плазмохимических реакциях и входят в структуру покрытия, модифицируя его [8, 10, 14–18]. Но эти процессы только на первый взгляд выглядят одностадийными. Ведь использование дисперсных порошков ПТФЭ, графита или дисульфида молибдена также сопряжено с определенными дополнительными технологическими операциями. Для приготовления электролитов-суспензий требуется взвешивание порошков, измельчение частиц с помощью ультразвука, разбавление порошков в электролите с добавлением поверхностно-активных веществ (ПАВ) и т.п.

В настоящей статье описывается разработка высокоэффективной промышленной технологии ПЭО, обеспечивающей получение защитных композиционных антифрикционных и антикоррозионных покрытий на деталях из легких сплавов без каких-либо дополнительных технологических операций, с минимальными затратами времени, энергии и материалов. Новая технология ПЭО является одностадийной высокоэффективной технологией для формирования относительно толстых (с оптимальной толщиной, позволяющей достичь требуемой работоспособности и долговечности покрытия) износостойких покрытий на легких сплавах. Для алюминиевых сплавов это составляет 55–65 мкм, для магниевых сплавов – 40–50 мкм, для титановых сплавов – 30–40 мкм.

ФОРМИРОВАНИЕ ЗАЩИТНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПЭО-ПОКРЫТИЙ

Предлагаемый способ ПЭО соединяет в себе два процесса: высокочастотное ПЭО с использованием микросекундных импульсов напряжения и тока [19–23] и самоорганизующийся процесс постоянного поступления в электролит дисперсных частиц графита, отделяющихся от графитовых противоэлектродов под воздействием плазменных разрядов во время ПЭО.

При высокочастотной высоковольтной технологии ПЭО используются биполярные импульсы напряжения и тока с очень малой длительностью (5–60 мкс). Такой процесс позволяет получать качественные наноструктурные ПЭО-покрытия с высокой твердостью и прочностью [24]. В условиях крайне малой длительности и высоких амплитуд напряжения в импульсах значительно ускоряются процессы электроплазмохимических реакций. Резко возрастает скорость перемещения ионов в зонах пробоев. Все это обусловливает существенное увеличение скорости формирования керамических покрытий. Производительность ПЭО-процесса достигает 1,7–2,5 мкм/мин, что вдвое превышает производительность традиционного ПЭО и удовлетворяет требованиям серийного производства.

В предлагаемом способе процесс оксидирования совмещается с процессом образования электролита-суспензии непосредственно в ванне за счет постоянного поступления микрочастиц графита, отделяющихся от графитовых противоэлектродов под воздействием плазменных разрядов и электроэрозии [24]. Суспензия образуется естественным образом без применения дополнительных технологических приемов и использования порошковых материалов.

Электролиты-суспензии, созданные путем добавления порошков в базовые электролиты, недостаточно стабильны. Несмотря на интенсивное перемешивание и применение ПАВ, при перерывах в работе частицы оседают на дно ванны и поднять их вновь крайне затруднительно. Кроме того, при оксидировании постоянно уменьшается концентрация дисперсных частиц в электролите-суспензии, что требует периодической корректировки ее концентрацию путем добавления порошка. Все это не дает возможности получать равномерные

однородные по составу ПЭО-покрытия и отрицательно влияет на воспроизводимость результатов процесса. В предлагаемом способе постоянное поступление в базовый электролит равных объемов частиц графита в равные периоды времени позволяет достигать равномерного распределения их как в самой суспензии, так и в структуре оксидно-керамического покрытия. В новом способе противоэлектроды выполняются из прочного мелкозернистого графита, обладающего высокой электропроводностью, повышенной коррозионной и эрозионной стойкостью. Материал легко обрабатывается и относительно дешев. Обычно при ПЭО-обработке традиционно используются противоэлектроды из нержавеющей стали (типа 08Х18Н10). В процессе оксидирования такие противоэлектроды под действием электрокоррозии и электроэрозии довольно быстро покрываются оксидной пленкой, которая резко снижает скорость роста ПЭО-покрытия. Поэтому приходится периодически прерывать ПЭО-процесс и зачищать поверхности противоэлектродов от ржавчины, что удлиняет и удорожает процесс оксидирования.

В отличие от стальных противоэлектродов на графитовых во время оксидирования не образуется оксидного слоя, препятствующего процессу ПЭО. Кроме того, часто для получения равномерных по толщине покрытий на сложнопрофильных деталях используются фасонные противоэлектроды, повторяющие конфигурацию оксидируемых деталей. Выполнить фасонные противоэлектроды из графита не составляет труда, тогда как при изготовлении их из нержавеющей стали требуются большие трудозатраты.

В процессе ПЭО в электролит постоянно поступают микрочастицы графита различной степени дисперсности. Анализ размеров взвешенных частиц в электролите-суспензии, проведенный с помощью лазерного анализатора Bettersizer S2 (Bettersize Instruments), показал, что размеры частиц находятся в диапазоне 0,03–2,0 мкм. При этом концентрация дисперсных частиц графита в суспензии зависит от интенсивности режимов электролиза (плазменных разрядов). Для улучшения кинетической устойчивости образующейся суспензии в базовый электролит дополнительно вводится органический стабилизатор – глицерин ($C_3H_8O_3$) в концентрации 2 г/л. Такая концентрация достаточна для полного смачивания частиц графита глицерином. Таким образом, обеспечивается поддержание электролита-суспензии в рабочем состоянии в течение всего срока его эксплуатации.

При оксидировании частицы графита, обладая отрицательным зарядом в щелочном электролите, устремляются к оксидируемой поверхности и абсорбируются на ней, участвуя в создании композиционного покрытия. Одна часть частиц, попадая в зону воздействия плазменных разрядов, подвергается термолизу. Это приводит к повышению температуры разрядов, прогреву покрытия и, как следствие, дополнительному образованию в нем высокотемпературных фаз оксидов и даже карбидов. При этом еще больше возрастают микротвердость ПЭО-покрытия и производительность оксидирования. Другая часть частиц графита, не попавшая в зону плазменных разрядов, встраивается в керамическую структуру покрытия в неизменном виде и заполняет собой открытые поры и микротрещины, герметизируя покрытие. При этом основной диапазон диаметров открытых микропор покрытия совпадает с размерами дисперсионных частиц графита. Благодаря этому возрастают антифрикционные и антикоррозионные свойства композиционного покрытия.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПЭО-ПОКРЫТИЙ

ПЭО-обработке подвергались образцы-диски диаметром 60 мм и толщиной 6 мм из алюминиевого сплава Д16Т (Al-Cu-Mg), магниевого сплава МА5 (Mg-Al-Zn-Mn) и титанового сплава ВТ6 (Ti-Al-V). Образцы из каждого материала подвергали оксидированию в двух вариантах: базовом и композиционном. В базовых вариантах оксидирование проводилось в базовых электролитах. При этом в ванне в качестве противоэлектродов устанавливались пластины из нержавеющей стали. Пластины располагались на расстоянии 15 мм с обеих сторон от торцевых плоскостей образцов-дисков. Полученные после оксидирования оксидно-керамические покрытия назывались базовыми ПЭО-покрытиями. В композиционных вариантах оксидирование велось также в базовых электролитах, но с добавкой глицерина 2 г/л. При этом в ванне в качестве противоэлектродов устанавливались пластины из высокопрочного графита МПГ-8. Пластины располагались на расстоянии 15 мм с обеих сторон от торцевых плоскостей образцов-дисков. Полученные после оксидирования графитокерамические покрытия назывались композиционными ПЭО-покрытиями.

Оксидирование образцов из одного и того же материала в обоих вариантах проводилось на одних и тех же режимах электролиза. Режимы формирования ПЭО-покрытий приведены в табл. 1. Продолжительность оксидирования была

Таблица 1. Режимы формирования ПЭО-покрытий

Параметры оксидирования	Алюминиевый сплав Д16Т	Магниевый сплав МА5	Титановый сплав ВТ6
Состав электролита	Силикатно-фосфатный	Силикатно-фосфатно-фторидный	Алюминатно-фторидный
Температура электролита, град. С	12–15	12–15	12–15
Амплитуда анодного напряжения, В	1000	520	560
Амплитуда катодного напряжения, В	350	210	250
Плотность анодного тока, А/дм^2	15	8	10
Плотность катодного тока, А/дм^2	20	10	12
Частота импульсов напряжения и тока, кГц	4,0	2,5	2,0
Время оксидирования, мин	35	25	20

обусловлена толщиной покрытий, которая должна быть достаточной для обеспечения работоспособности упрочненного слоя в течение всего срока эксплуатации изделия.

Исследования покрытий проводились с использованием стандартных методов и методик для определения показателей защитных свойств покрытий.

Толщина и микротвердость ПЭО-покрытий измерялись на поперечных шлифах с помощью твердомера Nano Hardness Tester (CSM Instruments) при нагрузке 100 мН. Среднее значение микротвердости рассчитывали по результатам 13 измерений на образец.

Износостойкость и коэффициент трения скольжения сформированных ПЭО-покрытий исследовали методом трибометрии на приборе Tribometer (CSM Instruments). Испытания проводились по схеме «диск–шарик» при скорости скольжения 50 м/с в режиме сухого трения, нагрузке 10 Н и комнатной температуре. В качестве контртела использовался шарик из SiC диаметром 5 мм. Длина пути трения составляла 1000 м. Определялась глубина следа шарика на покрытии и вычислялась степень износа (потеря объема).

Во всех экспериментах износ шарика был минимален и не учитывался в расчетах. Случаев протирания ПЭО-покрытия до металлической подложки не наблюдалось.

Исследование коррозионной стойкости сформированных ПЭО-покрытий проводили с помощью камеры солевого тумана (КСТ). Коррозионная стойкость покрытий определялась временем выдержки образцов в КТС до появления первых следов коррозии. Образцы выдерживались в тумане, полученном с использованием 5%-го раствора NaCl. Раствор распылялся в КТС в течение 15 минут через каждые 45 минут. Образцы устанавливались под углом 70 градусов к горизонту. Оценка состояния поверхности образцов осуществлялась каждые 24 часа экспозиции в КТС.

Оценку гидрофобности ПЭО-покрытий проводили методом сидячей капли путем измерения краевого угла смачивания. Каплю деионизированной воды сажали на исследуемую поверхность образца с помощью шприца. Диаметр капли составлял 3–5 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Физико-механические свойства ПЭО-покрытий

Результаты исследований физико-механических характеристик сформированных ПЭО-покрытий приведены в табл. 2.

На всех исследуемых вентильных сплавах микротвердость композиционных ПЭО-покрытий оказалась до 10% выше микротвердости базовых ПЭО-покрытий. Это говорит об интенсификации ПЭО-процесса за счет термолиза части дисперсных частиц графита, попавших в зону действия плазменных разрядов. Более того, также несколько увеличилась толщина композиционных ПЭО-покрытий по сравнению с базовыми ПЭО-покрытиями, хотя время их оксидирования было одинаковым. Это свидетельствует о дальнейшем росте производительности ПЭО-процесса при использовании предлагаемого способа оксидирования.

Фрикционные свойства ПЭО-покрытий

Результаты сравнительных трибологических испытаний сформированных ПЭО-покрытий приведены в табл. 3.

Таблица 2. Физико-механические характеристики ПЭО-покрытий

Физико-механические характеристики покрытий	Алюминиевый сплав Д16Т		Магниевый сплав МА5		Титановый сплав ВТ6	
	Базовое ПЭО-покрытие	Композиционное ПЭО-покрытие	Базовое ПЭО-покрытие	Композиционное ПЭО-покрытие	Базовое ПЭО-покрытие	Композиционное ПЭО-покрытие
Толщина, мкм	56	60	42	45	33	35
Микротвердость, HV	2050	2200	720	805	870	960

Таблица 3. Фрикционные показатели ПЭО-покрытий

Фрикционные показатели покрытий	Алюминиевый сплав Д16Т		Магниевый сплав МА5		Титановый сплав ВТ6	
	Базовое ПЭО-покрытие	Композиционное ПЭО-покрытие	Базовое ПЭО-покрытие	Композиционное ПЭО-покрытие	Базовое ПЭО-покрытие	Композиционное ПЭО-покрытие
Коэффициент сухого трения	0,63	0,19	0,42	0,15	0,35	0,12
Износ покрытия, $мм^3/(Н*м)$	$6,5\times10^{-5}$	$4,7\times10^{-7}$	$5,7\times10^{-4}$	$5,2\times10^{-5}$	$1,0\times10^{-5}$	$0,7\times10^{-6}$

Таблица 4. Показатели коррозионной стойкости ПЭО-покрытий

Показатели	Алюминиевый	сплав Д16Т	Магниевый	сплав МА5	Титановый	сплав ВТ6
Коррозионной стойкости	Базовое ПЭО-покрытие	Композиционное ПЭО-покрытие	Базовое ПЭО-покрытие	Композиционное ПЭО-покрытие	Базовое ПЭО-покрытие	Композиционное ПЭО-покрытие
Время выдержки в КСТ, ч	1008	1976	576	960	672	1196

Сравнительные трибологические испытания показали существенные преимущества образцов с композиционными ПЭО-покрытиями над образцами с базовыми ПЭО-покрытиями. Так, коэффициент трения оказался втрое ниже, а стойкость к механическому износу увеличилась на 1–2 порядка. Присутствующий на поверхности композиционных покрытий графит играет роль твердой смазки. А сочетание высокой твердости ПЭО-покрытия и антифрикционных свойств графита обусловливает повышенную износостойкость защитных композиционных покрытий.

Коррозионная стойкость ПЭО-покрытий

Результаты сравнительных коррозионных испытаний в КСТ сформированных ПЭО-покрытий приведены в табл. 4.

Коррозионные испытания образцов, проведенные в КСТ, продемонстрировали достаточно высокие результаты коррозионной стойкости как у базовых ПЭО-покрытий (что свидетельствует о низкой их дефектности), так и у композиционных ПЭО-покрытий. После проведения испытаний (до 24–42 суток) на поверхностях образцов с микропористыми базовыми ПЭО-покрытиями наблюдалось некоторое количество дефектных зон. Длительное воздействие хлорид-содержащей среды привело к проникновению ее через микропоры керамических слоев к металлическим подложкам. В результате этого под ПЭО-покрытием начался процесс коррозии. У образцов с композиционными ПЭО-покрытиями после испытаний наблюдалось лишь несколько дефектных точек, расположенных на периферии образцов-дисков. Время выдержки в КТС у образцов с композиционными ПЭО-покрытиями оказалось в среднем вдвое выше, чем у образцов с базовыми ПЭО-покрытиями. Это свидетельствовало о герметизации (запечатывании) микропор керамических слоев химически инертным графитом. Наибольшую стойкость к разрушающему воздействию коррозионной среды показало композиционное ПЭО-покрытие на алюминиевом сплаве Д16Т (около 2000 часов).

Смачиваемость ПЭО-покрытий

Показатели смачиваемости исследуемых ПЭО-покрытий приведены в табл. 5.

Измерения краевого угла смачивания между поверхностью ПЭО-покрытия и каплей воды

Таблица 5. Показатели смачиваемости ПЭО-покрытий

Показатели смачивания покрытий	Алюминиевый сплав Д16Т		Магниевый сплав МА5		Титановый сплав ВТ6	
	Базовое ПЭО-покрытие	Композиционное ПЭО-покрытие	Базовое ПЭО-покрытие	Композиционное ПЭО-покрытие	Базовое ПЭО-покрытие	Композиционное ПЭО-покрытие
Краевой угол смачивания, град.	49	94	55	99	59	104

показали, что величина краевого угла на поверхностях базовых ПЭО-покрытий составила 49–59 градусов. Это свидетельствует о том, что поверхности у базовых ПЭО-покрытий обладают гидрофильными свойствами. В то же время краевой угол на поверхностях композиционных ПЭО-покрытий за счет присутствия на них графита, обладающего низкой поверхностной энергией, составил 94–104 градуса (то есть более 90 градусов). Это свидетельствует о том, что поверхности композиционных ПЭО-покрытий обладают гидрофобными свойствами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан высокоэффективный одностадийный способ формирования на легких металлах (Al, M g, Ti) и их сплавах защитных композиционных графитокерамических покрытий. Способ включает в себя одновременно высокочастотное плазменное электролитическое оксидирование (ПЭО) и модификацию формирующегося покрытия графитом, образующимся в электролите за счет отделения дисперсных частиц от графитовых противоэлектродов под воздействием плазменных разрядов и электроэрозии. Себестоимость формирования 1 кв. дм графитокерамического покрытия, полученного по предлагаемому способу, в 2–3 раза ниже себестоимости аналогичного покрытия, сформированного при ПЭО в электролите-суспензии, приготовленной с помощью диспергированного графита в порошке.

Исследования защитных композиционных ПЭО-покрытий, полученных предлагаемым способом, показали, что они значительно превосходят по своим эксплуатационным свойствам базовые ПЭО-покрытия, не модифицированные графитом. Базовые ПЭО-покрытия формировались в тех же базовых электролитах, на тех же режимах электролиза, но с использованием стальных противоэлектродов. По сравнению с базовыми ПЭО-покрытиями композиционные ПЭО-покрытия обладают на 10% большей микротвердостью, на 1–2 порядка увеличенным сопротивлением износу, втрое более низким коэффициентом трения и вдвое более высокой коррозионной стойкостью. Композиционные ПЭО-покрытия также обладают гидрофобными свойствами.

При эксплуатации ПЭО-слои воспринимают механические нагрузки, сопротивляясь изнашиванию и процарапыванию. Графит же защищает ПЭО-покрытие и подложку от воздействия агрессивных сред и выполняет функцию антифрикционной твердой смазки.

Одновременно с заметным повышением уровня практически значимых свойств композиционных ПЭО-покрытий (антифрикционных, износостойких, коррозионностойких) предлагаемый способ позволяет предельно упростить его, сделать высокотехнологичным и, как следствие, сократить затраты труда, энергии, материалов при формировании защитных покрытий.

Высокоэффективные композиционные ПЭО-покрытия призваны обеспечить надежную и долговечную работу узлов трения механизмов, эксплуатируемых в широком диапазоне нагрузок, скоростей и агрессивных видов воздействия.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Эпельфельд, А.В., Белкин, П.Н., Борисов, А.М., Васин, В.А., и др., *Современные технологии модификации поверхности материалов и нанесения защитных покрытий*. Т. 1. *Микродуговое оксидирование*. СПб.: Реноме, 2017. 648 с.
2. Ракоч, А.Г., Гладкова, А.А., Дуб, А.В., Плазменно-электролитическая обработка алюминиевых и титановых сплавов. М.: Изд. дом МИСиС, 2017. 160 с.
3. Lugovskoy, A. and Zihigrad, M., Plasma electrolytic oxidation of valve metals, *Materials Science – Advanced Topics*. Yitzhak Mastai (Ed.). InTechOpen, 2013, p. 85.
4. Krishna, L.R., Purnima, A.S. and Sundararajan, G., A comparative study of tribological behavior of microarc oxidation and hard-anodized coatings, *Wear*, 2006, vol. 261, no. 10, p. 1095.
5. Matykina, E., Arrabal, R., Skeldon, P. and Thompson, G.E., Investigation of the growth

processes of coatings formed by AC plasma electrolytic oxidation of aluminium, *Electrochim. Acta*, 2009, vol. 54, p. 6767.

6. Погребняк, А.Д., Каверина, А.Ш., Кылышканов, М.К., Электролитно-плазменная технология для нанесения покрытий и обработки металлов и сплавов, *Физикохимия поверхности и защита материалов*, 2014, т. 50, № 1, с. 72.

7. Hussein, R.O., Nie, X. and Northwood, D.O., Influence of process parameters on electrolytic plasma discharging behavior and aluminium oxide coating microctructure, *Surf. Coat. Technol.*, 2010, vol. 205, p. 1659.

8. Борисов, А.М., Крит, Б.Л., Людин, В.Б., Морозова, Н.В., и др., Микродуговое оксидирование в электролитах-суспензиях (обзор), *ЭОМ*, 2016, т. 52, № 1, с. 50.

9. Минаев, А.Н., Гнеденков, С.В., Синебрюхов, С.Л., Машталяр, Д.В., и др., Наноразмерные материалы в плазменно-электролитическом формировании композиционных защитных покрытий, *Вестник Рос. фонда фунд. исслед.*, 2011, № 1, с. 81.

10. Руднев, В.С., Устинов, А.Ю., Ваганов-Вилькинс, А.А., Недозоров, П.М., и др., Получение плазменно-электролитическим оксидированием политетрафторполиэтилен- или графитсодержащих оксидных слоев на алюминии и титане и их строение, *Журн. физич. химии,* 2013, т. 87, № 6, с. 1031.

11. Гнеденков, С.В., Синебрюхов, С.Л., Машталяр, Д.В., Надараиа, К.В., и др., Формирование защитных композиционных покрытий на магниевом сплаве с применением водной суспензии ультрадисперсного политетрафторэтилена, *Вестник ДВО РАН*, 2016, № 6, с. 77.

12. Белов, Е.А., С.Л., Надараиа, К.В., Машталяр, Д.В., Имшинецкий, И.М., и др., Композиционные покрытия, полученные методом ПЭО с последующим нанесением полимера из водной суспензии УТПФЭ, *Вестник ДВО РАН*, 2021, № 6, с. 5.

13. Gnedenkov, S.V., Sinebryukhov, S.L., Mashtalyar, D.V., Egorkin, V.S., et al., Composite polymer-containing protective coatings on magnesium alloy MA8, *Corr. Sci*., 2014, vol. 85, p. 52.

14. Ma, K.-J., Al Bosta, M.M.S. and Wu, W.-T., Preparation of self-lubricating composite coatings through a micro-arc plasma oxidation with graphite in electrolyte solution, *Surf. Coat. Technol*., 2014, vol. 259, Part B, p. 318.

15. 吴向清 杨志成 项嘉义 谢发勤, Method for improving abrasion resistance of magnesium alloy micro-arc oxide film through nano graphite. Northwestern Politechnical University. Patent CN 103173837A (China).
https://patents.google.com/patent/CN103173837A/en

16. 陈德辉, The method that wear-resisting differential arc oxidation film layer is prepared in aluminium alloy surface. Jiangmen Jianghai Jed Chemical Co Ltd. Patent CN 107740157A (China).
https://patents.google.com/patent/CN107740157A/en

17. Lou, B.-S., Lee, J.-W., Tseng, C.-M., Lin, Y.-Y., et al., Mechanical property and corrosion resistance evaluation of AZ31 magnesium alloys by plasma electrolytic oxidation treatment: Effect of MoS_2 particle addition, Surf. Coat. Technol., 2018, vol. 350, p. 813.

18. 赵晴, 朱文辉, 邵志松, A method for preparing titanium-alloy surface micro-arc oxidation antifriction compound film layer. Nanchang Hangkong University. Patent CN 102021629A (China).
https://patents.google.com/patent/CN102021629A/en

19. Егоркин, В.С., Вялый, И.Е., Синебрюхов, С.Л., Пузь, А.В., и др., Формирование ПЭО-покрытий на титане в микросекундном импульсном режиме, *Вестник ДВО РАН*, 2014, № 2, с. 46.

20. Кокарев, В.Н., Маликов, Н.А., Орлов, Е.А., Шатров, А.С., Способ формирования защитного оксидно-керамического покрытия на поверхности вентильных металлов и сплавов. Патент RU 2681028 C2 (Россия).
https://patents.google.com/patent/RU2681028C2/ru

21. Suda, A. and Konishi, T., Method of electrolytic ceramic coating for metal, electrolysis solution for electrolytic ceramic coating for metal, and metallic material. Patent US 2012/0000783 (USA).

22. Egorkin, V.S., Vyaliy, I.E., Sinebryukhov, S.L. and Gnedenkov, S.V., Duty cycle of the polarizing signal influence on morphology and properties of the PEO-coating on aluminium alloy, Sol. State Phenom., 2016, vol. 245, p. 121.
https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.245.121

23. Шатров, А.С., Кокарев В.Н., Петржик М.И., Муканов С.К., Влияние режимов процесса плазменного электролитического оксидирования алюминиевых сплавов на структуру и свойства защитных оксидно-керамических покрытий, ЭОМ, 2024, т. 60, № 2, с. 31.

24. Кокарев, В.Н., Шатров, А.С., Способ получения композиционного самосмазывающегося керамического покрытия на деталях из вентильных металлов и их сплавов. Патент RU2807788C1 (Россия).
https://patents.google.com/patent/RU2807788C1/ru

Summary

An efficient one-step method of formation of protective graphite ceramic coatings on light alloys (Al, Mg, Ti) has been developed. The method includes simultaneously high-frequency PEO-treatment and modification of ceramic coating with graphite formed in the electrolyte due to separation of dispersed particles from graphite counter electrodes under the action of plasma discharges and electroerosion. Studies of protective composite PEO-coatings obtained by the proposed method have shown that they are

significantly superior in their performance properties to basic PEO-coatings not modified with graphite. Compared to basic PEO-coatings, the composite PEO-coatings had 10% higher microhardness, had one to two orders of magnitude higher wear resistance, three times lower coefficient of friction, and twice higher the corrosion resistance. Composite PEO-coatings also have hydrophobic properties. Also, the proposed method is highly technological, extremely simple and allows to significantly reduce labor, material and energy costs.

Keywords: plasma electrolytic oxidation, protective coatings, composite coatings, dispersed graphite, wear resistance, corrosion resistance, light alloys