

Д.В. МАШТАЛЯР, К.В. НАДАРАИА, Е.А. БЕЛОВ,
С.Л. СИНЕБРЮХОВ, С.В. ГНЕДЕНКОВ

Изменение свойств композиционных покрытий в ходе климатических испытаний в камере соляного тумана

В статье представлен анализ изменения в ходе климатических испытаний в камере соляного тумана защитных свойств композиционных покрытий, полученных на магниевом сплаве МА8 методом плазменного электролитического оксидирования с последующей обработкой в водной суспензии ультрадисперсного политетрафторэтилена. Изучена динамика изменения электрохимических свойств композиционных полимерсодержащих покрытий. Оценено влияние кратности нанесения композиционного слоя на стойкость покрытий к коррозии. Установлено, что полимерсодержащее покрытие, полученное плазменным электролитическим оксидированием и трехкратной обработкой в суспензии ультрадисперсного политетрафторэтилена, обладает наибольшей стойкостью к коррозионному разрушению в связи с высокой однородностью получаемого композиционного слоя. После 40 сут нахождения в агрессивной коррозионной среде значения поляризационного сопротивления и модуля импеданса для данного вида покрытия выше на один порядок в сравнении с базовым ПЭО-покрытием до начала испытаний.

Ключевые слова: магний, плазменное электролитическое оксидирование, композиционное покрытие, полимерсодержащее покрытие, климатические испытания, камера соляного тумана, защитные покрытия, коррозионная стойкость.

Change in the properties of composite coatings during climatic tests in a salt spray chamber. D.V. MASHTALYAR^{1,2}, K.V. NADARAIA^{1,2}, E.A. BELOV¹, S.L. SINEBRYUKHOV¹, S.V. GNEDENKOV¹ (¹Institute of Chemistry, FEB RAS, Vladivostok, ²Far Eastern Federal University, Vladivostok).

The paper presents analysis of changes in the protective properties of composite coatings obtained on the MA8 magnesium alloy by plasma electrolytic oxidation followed by treatment in an aqueous suspension of superdispersed polytetrafluoroethylene, during salt spray test. The dynamics of changes in the electrochemical properties of composite polymer-containing coatings was studied. The effect of the multiplicity of the application of the composite layer on the corrosion resistance of the coatings was estimated. It was established that the polymer-containing coating obtained by the plasma electrolytic oxidation and threefold treatment in the superdispersed polytetrafluoroethylene suspension has the highest resistance to corrosion due to the greater homogeneity of the obtained composite layer. After 40 days of exposure to an aggressive corrosive environment, the values of polarization resistance and impedance modulus for this type of coating are one order of magnitude higher than those for the base PEO-coating before test.

Key words: magnesium, plasma electrolytic oxidation, composite coating, polymer-containing coating, climatic tests, salt spray chamber, protective coatings, corrosion resistance.

МАШТАЛЯР Дмитрий Валерьевич – кандидат технических наук, заведующий лабораторией, доцент, НАДАРАИА Константин Вахтангович – кандидат химических наук, старший научный сотрудник, старший преподаватель (Институт химии ДВО РАН, Владивосток, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток), *БЕЛОВ Евгений Алексеевич – младший научный сотрудник, СИНЕБРЮХОВ Сергей Леонидович – доктор химических наук, заместитель директора, ГНЕДЕНКОВ Сергей Васильевич – член-корреспондент РАН, доктор химических наук, директор (Институт химии ДВО РАН, Владивосток). *E-mail: belov_cal@mail.ru

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН Института химии ДВО РАН (тема № 265-2019-0001). Электрохимические исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 20-13-00130).

Введение

Перспективы применения магниевых сплавов во многих отраслях промышленности и техники обуславливают необходимость их защиты от коррозионного разрушения [5]. Одним из основных и широко освещенных способов эффективного повышения антикоррозионных свойств изделий из металла является формирование на его поверхности керамикоподобного защитного слоя методом плазменного электролитического оксидирования [4, 6, 12, 16]. Под действием электрического тока на поверхности металлической подложки образуются короткоживущие дуговые разряды, в каналах которых материал подложки взаимодействует с электролитом [3, 6, 15].

Полученное данным методом покрытие является пористым [14]. В связи с этим ПЭО-слой позволяет внедрить полимерный материал для модификации покрытия с целью улучшить его защитные характеристики. Наиболее перспективен для этой роли ультрадисперсный политетрафторэтилен, обладающий высокой стойкостью, низкой поверхностной энергией и широким диапазоном температур [8–11].

Однако в основном исследуются покрытия, не прошедшие какого-либо срока службы или хранения и находящиеся полностью в условиях лабораторного эксперимента. Указанные в работах [8–11] показатели защитных свойств покрытий находятся на своих пиковых значениях. Это не дает возможности в полной мере проследить процессы коррозии и разрушения в течение длительного срока эксплуатации или в условиях интенсивного воздействия на них агрессивной среды, чтобы оценить устойчивость сформированных слоев.

Одним из методов проверки стойкости покрытий и сохранения защитных свойств в условиях агрессивной окружающей среды являются климатические испытания в камере соляного тумана (КСТ). Агрессивное воздействие коррозионной среды выявляет присутствующие в образцах дефекты и стойкость композиционных покрытий к разрушению в данных условиях. По мере извлечения образцов из КСТ проводятся электрохимические измерения для оценки изменения защитных свойств покрытий во время испытаний.

Оценка стойкости композиционных слоев к разрушительному воздействию окружающей среды является важным аспектом исследования их защитных свойств. Она необходима для всех типов композиционных покрытий в различных условиях эксплуатации. Для интересующих нас защитных покрытий на металлических изделиях этот аспект почти не освещен, что открывает поле для исследований в данной области.

В данной работе рассмотрена динамика изменения защитных свойств в ходе ускоренных климатических испытаний в КСТ покрытий, полученных на магниевом сплаве МА8 методом плазменного электролитического оксидирования с последующим внедрением ультрадисперсного политетрафторэтилена из водной суспензии.

Материалы и методики экспериментов

Образцы. Образцы были изготовлены из сплава магния МА8 (система Mg–Mn–Ce, в масс. %: 1,30 Mn; 0,15 Ce; остальное – Mg). Геометрические размеры образцов $45 \times 35 \times 1$ мм. Образцы перед нанесением покрытий механически обрабатывали шлифовальной бумагой с уменьшением зернистости до 10 мкм. Затем их промывали дистиллированной водой и обезжировали спиртом.

Формирование покрытий. Для формирования базового ПЭО-слоя использовался силикатно-фторидный электролит, содержащий 20 г/л ортосиликата натрия (Na_4SiO_4) и 5 г/л фторида натрия (NaF) [2, 12].

Образцы обрабатывались в два этапа в биполярном режиме, в котором анодные импульсы периодически чередуются с катодными [8, 12]. На первом этапе в анодной компоненте напряжение повышали с 20 до 280 В со скоростью 1,3 В/с, катодная компонента была зафиксирована потенциостатически на значении –50 В. На втором этапе напряжение

изменялось в анодной фазе с 280 до 200 В со скоростью 0,13 В/с, в катодной с –50 до –10 В со скоростью 0,07 В/с. Длительность первого этапа – 200 с, второго – 600 с. Соотношение анодного и катодного импульсов было равно 1, таким образом, коэффициент заполнения был равен 50 %, частота поляризующего сигнала – 300 Гц. Во время процесса оксидирования температуру электролита поддерживали постоянной ($(16 \pm 1)^\circ\text{C}$) с помощью охлаждающей установки ChillerSmart H150-3000 (LabTech Group, Великобритания).

Для формирования композиционных покрытий в данной работе применялся ультрадисперсный политетрафторэтилен торговой марки «Форум®», который получен методом термоградиентного синтеза фторопласта марки Ф-4 [13]. УПТФЭ представляет собой мелкодисперсный порошок, размер частиц которого варьирует от 0,2 до 1,5 мкм. С целью формирования композиционного покрытия применяли 11%-ю суспензию УПТФЭ в дистиллированной воде. Суспензию готовили методом последовательного добавления порций порошка «Форум®» вместе со смачивателем ОП-10 в водную среду, которая постоянно перемешивалась при высокой частоте вращения (около 1000 об/мин).

Композиционные покрытия наносили методом погружения образцов в водную суспензию на 10 с. Затем образцы сушили на открытом воздухе и помещали в муфельную печь L9/13/B180 (Nabertherm, Германия) для термической обработки при 315°C в течение 15 мин. Остывали образцы вместе с печью. С целью исследования влияния кратности обработки полимерным материалом на стойкость покрытий к коррозионному разрушению были сформированы композиционные покрытия с одно- (КП-1Х), двух- (КП-2Х) и трехкратным (КП-3Х) нанесением УПТФЭ.

Испытания в камере соляного тумана. Ускоренные атмосферные климатические испытания проводились согласно ГОСТ 30630.2.1-2013¹ в условиях повышенной агрессивности среды в камере соляного тумана (КСТ). Образцы были установлены под углом 75° к горизонту и выдерживались в тумане, полученном распылением 5%-го раствора NaCl. Раствор распылялся в КСТ в течение 15 мин через каждые 45 мин эксперимента. Общая длительность испытания составила 40 сут с промежуточным изъятием образцов через 4, 10, 20 и 30 сут с начала испытаний. Через 40 сут образцы извлекали, промывали дистиллированной водой для избавления от остатков соли, далее сушили теплым воздухом и упаковывали.

Визуальное сравнение образцов. Осмотр внешнего вида образцов позволил оценить степень повреждений, вызванных климатическими испытаниями, и сравнить стойкость различных покрытий к коррозионному разрушению. Отмечалось наличие питтингов и центров коррозионного разрушения покрытий.

Изучение электрохимических свойств. Электрохимические свойства образцов магниевого сплава без покрытия, с ПЭО-покрытием и композиционными покрытиями были исследованы методом потенциодинамической поляризации и электрохимической импедансной спектроскопии (ЭИС).

Измерения с применением электрохимической системы VersaSTAT MC (Princeton Applied Research, США) проводили в трехэлектродной ячейке при комнатной температуре в 3%-м растворе NaCl. В качестве противоиэлектрода использовали ниобиевую сетку, покрытую платиной. Электродом сравнения служил насыщенный каломельный электрод (н.к.э.). Рабочая площадь поверхности образца составляла 1 см^2 . Перед началом электрохимических измерений для установления электродного потенциала E_c и достижения стационарных условий эксперимента образцы выдерживали в растворе в течение 50 мин. Последнее измеренное значение потенциала стабилизировалось потенциостатически при проведении измерений ЭИС. Во время записи импедансного спектра синусоидальный сигнал имел амплитуду 10 мВ (среднеквадратичное значение), диапазон частот составлял

¹ ГОСТ 30630.2.1-2013. Методы испытаний на стойкость к климатическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на устойчивость к воздействию температуры (с поправкой). – Введ. 01.01.2015. М.: Изд-во стандартов, 2015.

от 0,01 Гц до 1 МГц при логарифмической развертке 10 точек на декаду. Потенциодинамические измерения проводили со скоростью развертки потенциала 1 мВ/с в диапазоне от $E_c - 0,15$ В до $E_c + 0,50$ В. При описании экспериментальной зависимости плотности тока I от потенциала E был использован метод Левенберга–Марквардта [7]:

$$I = I_c \left(10^{\frac{E-E_c}{\beta_a}} + 10^{\frac{E-E_c}{\beta_c}} \right).$$

Данный метод позволяет получить наиболее точные расчетные значения таких параметров, как потенциал коррозии E_c , плотность тока коррозии I_c , а также констант тафелевской зависимости катодного β_c и анодного β_a участков поляризационной кривой.

Поляризационное сопротивление R_p было определено в отдельном эксперименте при потенциодинамической поляризации образца в области потенциалов $\Delta E = E_c \pm 20$ мВ со скоростью развертки 0,167 мВ/с, при которой наблюдается линейная зависимость $I = f(E)$. Расчет значений R_p выполнен по формуле [1]: $R_p = \Delta E / \Delta I$.

Результаты и обсуждение

Оценка внешнего вида образцов

В результате визуального анализа состояния образцов без покрытий выявлены серьезные повреждения уже после 4 сут климатических испытаний (рис. 1, 4-а). Наблюдается образование множественных очагов коррозионных повреждений, продукты коррозии присутствуют в большом количестве. Состояние образцов по прошествии 10 сут характеризуется еще большей степенью разрушения (рис. 1, 10-а), при этом поверхность почти полностью покрыта продуктами коррозии. В связи со значительными нарушениями целостности магниевое сплава без покрытия на 10-е сутки выдержки в КСТ дальнейшее проведение климатических испытаний для данного вида образцов было признано нецелесообразным.

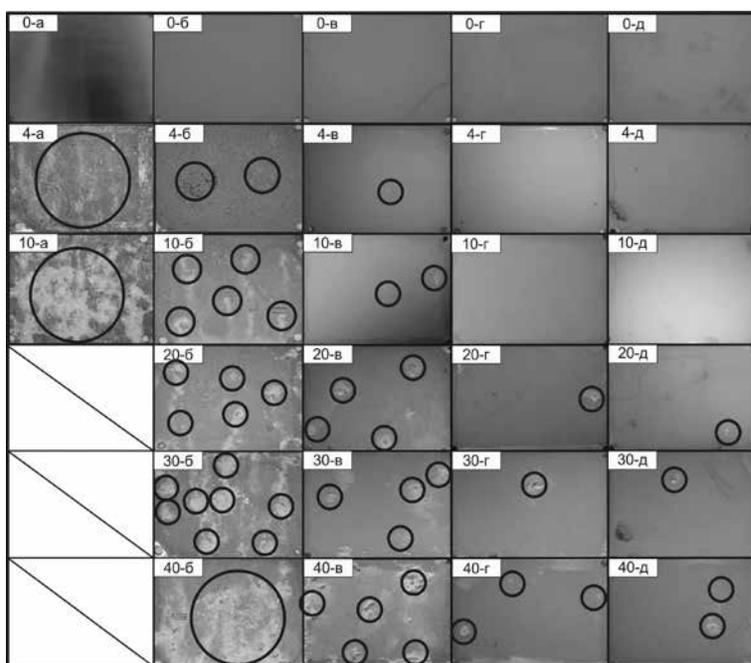


Рис. 1. Внешний вид образцов при проведении климатических испытаний (черными кружками выделены области выделения продуктов коррозии): а – сплав МА8 без покрытия, б – с базовым ПЭО-покрытием, в – КП-1Х, г – КП-2Х, д – КП-3Х; 0 – до начала испытаний, 4 – после 4 сут, 10 – после 10, 20 – после 20, 30 – после 30, 40 – по окончании испытаний

У образцов с базовым ПЭО-покрытием небольшие участки коррозии появились на 4-е сутки с начала испытаний (рис. 1, 4-б). В дальнейшем, на 10, 20, 30 и 40-е сутки (рис. 1, (10–40)-б), образуется большое количество продуктов коррозии и нарушается целостность защитного покрытия, что является следствием проникновения коррозионной среды через поры покрытия к металлической подложке. Отметим, что после 40 сут испытаний большая часть поверхности ПЭО-покрытия покрыта продуктами коррозии. Таким образом, данный вид покрытий подходит либо в качестве краткосрочной защиты магниевых сплавов в высокоагрессивных коррозионных средах, либо для использования в менее жестких условиях эксплуатации.

Для композиционных слоев с однократным нанесением УПТФЭ первые участки с дефектами появляются на 10-е сутки (рис. 1, 10-в). Далее площадь таких участков увеличивается (рис. 1, (20–40)-в), что обусловлено постепенным проникновением коррозионной среды через незапечатанные поры в базовом ПЭО-слое к материалу подложки.

Образцы КП-2Х демонстрируют более высокую стойкость в сравнении с КП-1Х. Так, первые питтинги появляются только на 20-е сутки эксперимента (рис. 1, 20-г), при этом они носят одиночный характер на протяжении всего времени выдержки (рис. 1, (20–40)-г).

Наибольшая коррозионная стойкость среди сформированных композиционных покрытий выявлена у образцов с трехкратным нанесением УПТФЭ. После 10 дней пребывания в агрессивной коррозионной среде (рис. 1 10-д) питтинги не наблюдались, а после 40 дней испытаний (рис. 1 40-д) у КП-3Х выявлена наименьшая степень разрушения.

Причиной столь высокой стойкости композиционного покрытия является наличие в его составе полимерного компонента – УПТФЭ, который в процессе формирования КП проникает в поры ПЭО-покрытия, постепенно запечатывая их по мере увеличения кратности нанесения. Так, в КП-3Х происходит заполнение практически всех пор и дефектов базового ПЭО-слоя и образуется ровное сплошное покрытие, в отличие от неоднородной поверхностной структуры КП с меньшей кратностью обработки УПТФЭ.

Электрохимические свойства композиционных покрытий

Результаты исследования коррозионных свойств покрытий представлены в виде графиков изменения их основных электрохимических параметров в зависимости от времени испытаний в камере соляного тумана (рис. 2). Как было отмечено выше, с увеличением кратности нанесения композиционного слоя растут количество включенного в состав покрытий полимера и однородность полимерного слоя, в результате чего создается практически однородная изолирующая пленка. Защитные свойства возрастают в ряду КП-1Х→КП-2Х→КП-3Х. Для полимерсодержащих покрытий наблюдаются более низкие значения плотности тока коррозии I_c (рис. 2, а), но более высокие значения поляризационного сопротивления R_p (рис. 2, б) и модуля импеданса $|Z|_{f=0,01 \text{ Гц}}$ (рис. 2, в), чем для базового ПЭО-слоя, как до начала климатических испытаний, так и после.

Исходя из анализа результатов потенциодинамической поляризации (рис. 2), происходит постепенное разрушение защитного покрытия в ходе увеличения времени выдержки образцов в КСТ. При этом для ПЭО-покрытия наблюдается некоторое снижение плотности тока коррозии и повышение поляризационного сопротивления на 4-е и 20-е сутки (рис. 2, а, б). По-видимому, в данном случае образующиеся продукты коррозии частично запечатывают поры, тем самым снижая площадь контакта агрессивной среды с магниевой подложкой. Однако в дальнейшем коррозионные повреждения становятся значительнее, что приводит к снижению защитных свойств ПЭО-слоя (рис. 2).

Для полимерсодержащих покрытий в ряду КП-1Х→КП-2Х→КП-3Х были выявлены следующие закономерности.

Для всех композиционных покрытий на 4-е сутки проведения эксперимента происходит резкое снижение защитных характеристик (рис. 2). Далее до 20-х суток снижение становится более плавным (рис. 2), это может быть обусловлено теми же причинами, что

и для ПЭО-покрытия, – образованием продуктов коррозии, которые затрудняют проникновение агрессивной среды к материалу подложки.

Защитные характеристики КП-1Х имеют тенденцию постоянного снижения на протяжении всего времени испытаний. Плотность токов коррозии постепенно растет, а поляризационное сопротивление и модуль импеданса, измеренный на частоте 0,01 Гц, снижаются. Значения электрохимических параметров стремятся к параметрам исходного магниевового сплава. Это обусловлено низкой однородностью покрытия и наличием оставшихся незапечатанными пор, трещин и микродефектов, в результате чего происходит быстрое разрушение защитного слоя за счет проникновения коррозионной среды к материалу подложки. В последующие 20 сут испытаний для КП-1Х наблюдается более интенсивное, чем в прошедшие 20 сут, снижение защитных свойств (рис. 2). Вероятно, присутствие не до конца запечатанных полимером пор в КП, через которые агрессивная среда проникает к магниевому сплаву, вызывает ускорение коррозионного процесса.

Композиционные покрытия с двукратным нанесением УПТФЭ продемонстрировали более высокую коррозионную стойкость в сравнении с КП-1Х. Плотность тока коррозии на протяжении 20 сут менялась незначительно (рис. 2, а), что указывает на высокую коррозионную стойкость данного вида поверхностных слоев. На 30-е сутки отмечено повышение плотности токов коррозии на порядок. Схожие тенденции были выявлены при оценке динамики изменений поляризационного сопротивления и модуля импеданса в зависимости от времени выдержки образцов в КСТ (рис. 2, б, в).

Наибольшую стойкость к коррозионной среде продемонстрировало композиционное покрытие с трехкратным нанесением фторполимера. Плотность тока коррозии на протяжении всего времени климатических испытаний оставалась наименьшей по сравнению с образцами с другими видами поверхностной обработки (рис. 2, а).

После 40 сут испытаний плотность тока коррозии (рис. 2, а), поляризационное сопротивление (рис. 2 б) и модуль импеданса (рис. 2, в) для композиционных покрытий с двукратным и трехкратным нанесением полимерсодержащего слоя имели близкие значения.

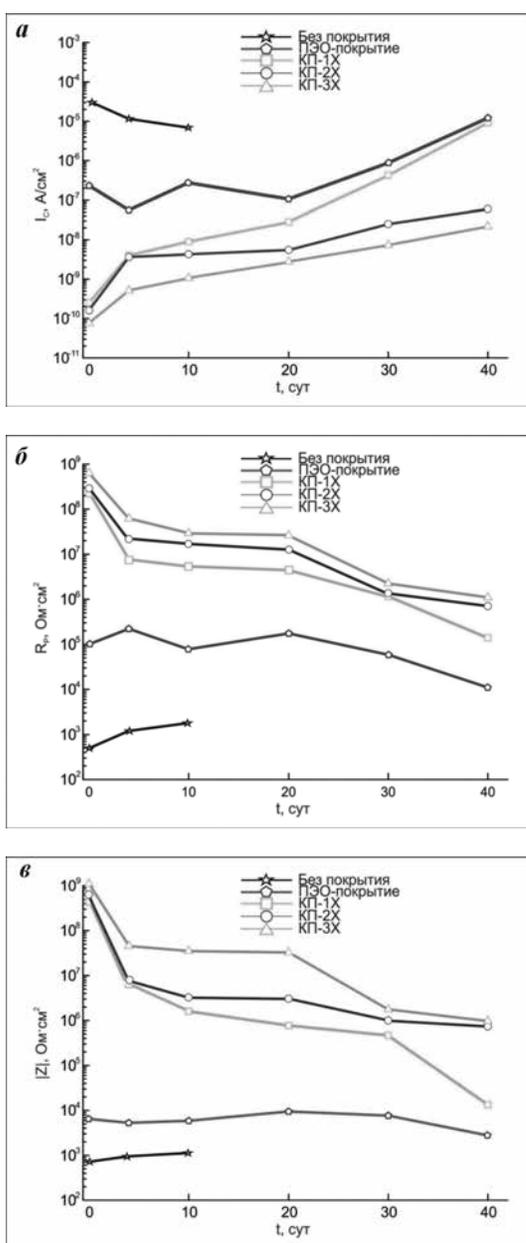


Рис. 2. Изменение плотности тока коррозии I_c (а), поляризационного сопротивления R_p (б) и модуля импеданса $|Z|_{f=0,01 \text{ Гц}}$ (в) у образцов с различными видами поверхностной обработки до начала климатических испытаний, на 4-е, 10, 20, 30 и 40-е сутки их проведения

По-видимому, это обусловлено тем, что и в случае двукратного нанесения КП формируется слой с высокой однородностью и небольшим количеством дефектов.

Выводы

Композиционные покрытия, сформированные на магниевом сплаве МА8 методом плазменного электролитического оксидирования с последующим внедрением полимера из водной суспензии УПТФЭ, были подвергнуты в течение 40 сут климатическим испытаниям в камере соляного тумана. Наибольшую стойкость к разрушающему воздействию коррозионной среды по результатам потенциодинамической поляризации продемонстрировало композиционное покрытие с трехкратным нанесением фторполимера. Плотность тока коррозии для него в течение всего времени испытаний имела наименьшее значение среди всех покрытий, что продемонстрировало высокую стойкость покрытия к разрушению. В целом в процессе выдержки образцов в камере соляного тумана защитные характеристики покрытий снижаются.

ЛИТЕРАТУРА

1. Надараиа К.В., Машталяр Д.В., Имшинецкий И.М., Синебрюхов С.Л., Гнеденков С.В. Композиционные покрытия, формируемые сочетанием плазменного электролитического оксидирования и распыления фторполимера: состав, морфология и электрохимические свойства // Вестн. ДВО РАН. 2019. № 6. С. 43–57.
2. Barati Darband G., Aliofkhaezai M., Hamghalam P., Valizade N. Plasma electrolytic oxidation of magnesium and its alloys: mechanism, properties and applications // J. Magn. Alloy. 2017. Vol. 5. P. 74–132.
3. Cui S., Han J., Du Y., Li W. Corrosion resistance and wear resistance of plasma electrolytic oxidation coatings on metal matrix composites // Surf. Coat. Technol. 2007. Vol. 201. P. 5306–5309.
4. Dehnavi V., Binns W.J., Noël J.J., Shoesmith D.W., Luan B.L. Growth behaviour of low-energy plasma electrolytic oxidation coatings on a magnesium alloy // J. Magn. Alloy. 2018. Vol. 6. P. 229–237.
5. Esmaily M., Svensson J.E., Fajardo S., Birbilis N., Frankel G.S., Virtanen S., Arrabal R., Thomas S., Johansson L.G. Fundamentals and advances in magnesium alloy corrosion // Prog. in Mater. Sci. 2017. Vol. 89. P. 92–193.
6. Gao Y., Yerokhin A., Matthews A. DC plasma electrolytic oxidation of biodegradable cp-Mg: In vitro corrosion studies // Surf. Coat. Technol. 2013. Vol. 234. P. 132–142.
7. Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V., Egorkin V.S., Tsvetnikov A.K., Minaev A.N. Charge transfer at the antiscaling composite layer-electrolyte interface // Prot. Metals. 2007. Vol. 43. P. 667–673.
8. Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V., Nadaraia K.V., Gnedenkov A.S., Bouzник V.M. Composite fluoropolymer coatings on the MA8 magnesium alloy surface // Corros. Sci. 2016. Vol. 111. P. 175–185.
9. Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Zavidnaya A.G., Egorkin V.S., Puz' A.V., Mashtalyar D.V., Sergienko V.I., Yerokhin A.L., Matthews A. Composite hydroxyapatite–PTFE coatings on Mg–Mn–Ce alloy for resorbable implant applications via a plasma electrolytic oxidation-based route // J. Taiwan Inst. of Chem. Engin. 2014. Vol. 45. P. 3104–3109.
10. Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V., Egorkin V.S., Sidorova M.V., Gnedenkov A.S. Composite polymer-containing protective coatings on magnesium alloy MA8 // Corros. Sci. 2014. Vol. 85. P. 52–59.
11. Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Mashtalyar D.V., Egorkin V.S., Tsvetnikov A.K., Minaev A.N. Composite polymer-containing protective layers on titanium // Prot. Metals. 2008. Vol. 44. P. 704–709.
12. Gnedenkov S.V., Khrisanfova O.A., Zavidnaya A.G., Sinebryukhov S.L., Egorkin V.S., Nistratova M.V., Yerokhin A., Matthews A. PEO coatings obtained on an Mg–Mn type alloy under unipolar and bipolar modes in silicate-containing electrolytes // Surf. Coat. Technol. 2010. Vol. 204. P. 2316–2322.
13. Ignatieva L.N., Gorbenco O.M., Kuryavyi V.G., Savchenko N.N., Pavlov A.D., Mashtalyar D.V., Bouzник V.M. Characteristics of the structure and properties of low-temperature fractions recovered from the powder ultradispersed polytetrafluoroethylene by sublimation // J. Fluor. Chem. 2013. Vol. 156. P. 246–252.
14. Lee K.M., Ko Y.G., Shin D.H. Microstructural characteristics of oxide layers formed on Mg–9wt%Al–1wt%Zn alloy via two-step plasma electrolytic oxidation // J. Alloys Comp. 2014. Vol. 615. P. S418–S422.
15. Němcová A., Skeldon P., Thompson G.E., Morse S., Čížek J., Pacal B. Influence of plasma electrolytic oxidation on fatigue performance of AZ61 magnesium alloy // Corros. Sci. 2014. Vol. 82. P. 58–66.
16. Toorani M., Aliofkhaezai M. Review of electrochemical properties of hybrid coating systems on Mg with plasma electrolytic oxidation process as pretreatment // Surf. Interfaces. 2019. Vol. 14. P. 262–295.