

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 538.9+543.55+52-334.2

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.02.009

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БОРСОДЕРЖАЩИХ ПЭО-ПОКРЫТИЙ, ФОРМИРУЕМЫХ НА МАГНИЕВОМ СПЛАВЕ МА8

Мария Сергеевна Герасименко¹, Сергей Николаевич Сучков²,
Игорь Михайлович Имшинецкий³, Константин Вахтангович Надараиа⁴,
Дмитрий Валерьевич Машталяр⁵, Сергей Леонидович Синебрюхов⁶,
Сергей Васильевич Гнеденков⁷

¹⁻⁷ Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук, проспект 100-летия
Владивостока, 159, Владивосток 690022, Россия

¹ gerasimenko.ms00@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0859-749X>

² snsuchkov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9151-3167>

³ igorimshin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5055-1834>

⁴ nadaraiakv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7835-2231>

⁵ madiva@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9645-4936>

⁶ sls@ich.dvo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0963-0557>

⁷ svg21@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1576-8680>

Аннотация. В работе представлено исследование свойств слоев, сформированных на магниевом сплаве МА8 методом плазменного электролитического оксидирования (ПЭО) в борсодержащих электролитах. Электрохимические свойства покрытий исследованы методом электрохимической импедансной спектроскопии. Механические характеристики покрытий оценивались по величине значений микротвердости и модуля Юнга. Показано, что образцы с покрытиями, формируемыми в потенциодинамических режимах, превосходят по показателям коррозионной стойкости сплав без покрытия более чем на 1 порядок величины. Внедрение частиц бора в состав покрытий позволяет улучшить механические свойства: универсальная микротвердость покрытий с частицами превышает на 10–12 % величину данного параметра для базовых ПЭО-покрытий.

Ключевые слова: плазменное электролитическое оксидирование, бор, магний, антикоррозионная защита, защитные покрытия.

Благодарности: Работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда (№24-79-00098).

Для цитирования: Герасименко М.С., Сучков С.Н., Имшинецкий И.М., Надараиа К.В., Машталяр Д.В., Синебрюхов С.Л., Гнеденков С.В. Электрохимические и механические свойства борсодержащих ПЭО-покрытий, формируемых на магниевом сплаве МА8 // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2025. Т. 22, № 2. С. 210-220. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.02.009.

Original article

ELECTROCHEMICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF BORON-CONTAINING PEO-COATINGS FORMED ON MAGNESIUM ALLOY MA8

Mariia S. Gerasimenko¹, Sergey N. Suchkov², Igor M. Imshinetsky³, Konstantine V. Nadaraia⁴,
Dmitry V. Mashtalyar⁵, Sergey L. Sinebryukhov⁶, Sergey V. Gnedenkov⁷

¹⁻⁷ Institute of Chemistry FEB RAS, 159 Pr. 100-Letiya Vladivostoka, Vladivostok, 690022, Russia

¹ gerasimenko.ms00@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0859-749X>

² snsuchkov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9151-3167>

³ igorimshin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5055-1834>

⁴ nadaraiakv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7835-2231>

⁵ madiva@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9645-4936>

⁶ sls@ich.dvo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0963-0557>

⁷ svg21@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1576-8680>

Abstract. The paper presents a study of the properties of layers formed on magnesium alloy MA8 by plasma electrolytic oxidation (PEO) in boron-containing electrolytes. The electrochemical properties of the coatings were investigated by electrochemical impedance spectroscopy. The mechanical characteristics of the coatings were estimated by the values of microhardness and Young's modulus. It is shown that samples with coatings formed in potentiodynamic modes are superior in terms of corrosion resistance to an uncoated alloy by more than 1 order of magnitude. The introduction of boron particles into the composition of coatings makes it possible to improve the mechanical properties: The universal microhardness of coatings with particles exceeds by 10-12% the value of this parameter for basic PEO coatings.

Keywords: plasma electrolytic oxidation, boron, magnesium, anti-corrosion protection, protective coatings.

Acknowledgements: The work is carried out within the framework of the project of the Russian Science Foundation No.24-79-00098.

For citation: Gerasimenko, M.S., Suchkov, S.N., Imshinetsky, I.M., Nadaraia, K.V., Mashtalyar, D.V., Sinebryukhov, S.L. & Gnedenkov, S.V. (2025). Electrochemical and mechanical properties of boron-containing PEO-coatings formed on magnesium alloy MA8. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 22(2), 210-220. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.02.009.

Введение

В настоящее время для защиты от негативного воздействия окружающей среды магния и его сплавов применяют различные методы модификации поверхности. Одним из перспективных способов повышения коррозионной и механической стойкости является формирование поверхностных слоев методом плазменного электролитического оксидирования (ПЭО) [1–3]. Данный способ широко распространен в промышленности благодаря результатам научных исследований, проводимых различными научными коллективами по всему миру [4–9]. Такой подход является эффективным для получения поверхностных керамикоподобных структур разнообразного химического состава и назначения на металлах вентильной группы, в том числе и на магнии [3]. Покрытия формируются посредством совокупности протекающих электро-, плазмо- и термохимических реакций на поверхности металлических изделий в водных электролитах.

Благодаря протекающим при формировании специфическим реакциям ПЭО-покрытия обладают высокой адгезией к подложке. Протекание на границе раздела электрод/электролит плазменных микрозарядов обуславливает наличие развитой поверхности, подходящей для формирования композитов на основе ПЭО-слоя. Одним из способов улучшения функциональных характеристик ПЭО-покрытий является введение микро- и наночастиц в состав электролита для плазменного

электролитического оксидирования [10–12]. В настоящее время микро- и наноразмерные материалы широко применяются в различных отраслях промышленности, их свойства позволяют создавать материалы, сочетающие в себе уникальные характеристики. Такие материалы востребованы в микроэлектронике, медицине, авиастроении, космической технике и в других областях современной науки и производства.

В мировой научной практике существует множество работ, посвященных модификации поверхности ПЭО-покрытий с использованием вводимых в электролит нано- и микрочастиц [13–18]. Так, в работах [15–17] было показано, что добавление наноразмерных диоксидов циркония и кремния улучшает коррозионные характеристики материала, а введение оксида алюминия или нитрида титана может на порядок увеличивать стойкость покрытий к механическому износу [13, 18]. Частицы оксида цинка могут способствовать приданию антибактериального эффекта поверхности, а включение гидроксиапатита в состав покрытий увеличивает остеоинтеграцию и биосовместимость материала с костной тканью [19]. Частицы диоксида титана могут способствовать проявлению у ПЭО-покрытий фотокаталитических свойств при введении их в состав поверхностного слоя [13, 20].

Материалы и методики исследования

В качестве подложки использовались пластины из магниевом сплава МА8 (в масс. %:

1,30 Мн; 0,15 Се; остальное – Mg) размером $20 \times 15 \times 1,5 \text{ мм}^3$. Перед формированием покрытий образцы шлифовались и обезжиривались. Процесс формирования проводился в биполярном режиме оксидирования, подробно описанном в предыдущей работе [21]. В каче-

стве базового электролита был выбран водный раствор NaF (5 г/л) и Na_2SiO_3 (20 г/л), содержащий частицы бора марок ВВ и ВА (ОСЧ, Россия). В таблице 1 приведены состав электролита для проведения ПЭО, режимов поляризации и обозначение полученных образцов.

Таблица 1. Обозначение исследуемых образцов в зависимости от используемых электролита и режима ПЭО.

Table 1. The designation of the studied samples depends on the electrolyte used and the PEO regime.

№	Электролит	Режим	Образец
1	NaF – 5 г/л; Na_2SiO_3 – 15 г/л	Гальваностатический	ПЭО-2
		Потенциодинамический	ПЭО-4
2	NaF – 5 г/л; Na_2SiO_3 – 15 г/л; ВВ – 5 г/л	Гальваностатический	ВВ12
		Потенциодинамический	ВВ14
3	NaF – 5 г/л; Na_2SiO_3 – 15 г/л; ВА – 2,5 г/л	Гальваностатический	ВА22

Электрохимические свойства сформированных покрытий были исследованы методом электрохимической импедансной спектроскопии. Измерения проводились в трехэлектродной ячейке на установке VersaSTAT MC (Princeton Applied Research, США) при температуре $(36,5 \pm 0,5)^\circ\text{C}$. В качестве электролита использовался 3,5 масс. % раствор NaCl. Электродом сравнения служил насыщенный каломельный электрод (н.к.э.). Рабочая площадь образца составляла 1 см^2 . Для достижения электрохимического равновесия перед началом измерений образцы выдерживались в электролите в течение 30 мин. В качестве возмущающего сигнала подавался синусоидальный импульс амплитудой 10 мВ. Спектр записывался при значении потенциала свободной коррозии в диапазоне частот от 0,01 Гц до 1 МГц с логарифмической разверткой 7 точек на декаду. Обработка данных и моделирование импедансных спектров с использованием соответствующих эквивалентных электрических схем (ЭЭС) производились с помощью программного обеспечения ZView 4. Потенциодинамические кривые записывались в диапазоне потенциалов от $E_C - 0,15 \text{ В}$ до $E_C + 0,50 \text{ В}$ со скоростью развертки 5 мВ/с. Потенциал коррозии (E_C), плотность тока коррозии (I_C), наклон катодного и анодного тафелевских участков поляризационной кривой (β_c , β_a соответственно) были рассчитаны (уравнение (1)) с применением подхода Левенберга-Марквардта [22, 23]. Поляризационное сопротивление (R_p) рассчитывалось по поляризационной кривой, записанной в отдельном

эксперименте, в соответствии с уравнением (2). Образцы поляризовались от $E_C - 0,02 \text{ В}$ до $E_C + 0,02 \text{ В}$ со скоростью 0,167 мВ/с.

$$I = i_c \left(10^{\frac{E-E_C}{\beta_a}} - 10^{-\frac{E-E_C}{\beta_c}} \right) \quad (1)$$

$$R_p = \left(\frac{\Delta E}{\Delta I} \right)_{\Delta E \rightarrow 0} \quad (2)$$

Микротвёрдость (H_μ) и модуль Юнга покрытий были определены с помощью динамического ультрамикротвердомера DUH-W201 (Shimadzu, Япония), оснащенного трехгранной алмазной пирамидой Берковича с углом при вершине 115° . Прикладываемая нагрузка во всех экспериментах составляла 100 мН, скорость нагружения – 13,23 мН/с, время удержания максимальной нагрузки – 30 с. Температура воздуха в помещении, где проводились испытания, составляла $22 - 24^\circ\text{C}$.

Результаты и их обсуждение

Анализ поляризационных кривых (рис. 1), а также значений плотности тока коррозии (I_C), потенциала коррозии (E_C) и поляризационного сопротивления (R_p) (табл. 2), указывает на значительное улучшение антикоррозионных свойств образцов из магниевого сплава после их обработки методом плазменного электролитического оксидирования.

Формирование ПЭО-покрытий на поверхности магниевого сплава приводит к уменьшению плотности тока коррозии и повышению потенциала коррозии, что связано с улучшением защитных характеристик покрытия.

Наилучшие защитные свойства демонстрирует образец с покрытием ПЭО-4. Несмотря на то, что покрытия, формируемые в потенциодинамических режимах более тонкие (примерно вдвое), они являются более плотными, на что указывают параметры ЭЭС для данных покры-

тий (табл. 3), а следовательно, обеспечивают более высокие антикоррозионные характеристики. Также у данных покрытий более плотный и толстый внутренний беспористый подслои, который вносит наибольший вклад в защитные свойства ПЭО-покрытий (табл. 3) [24].

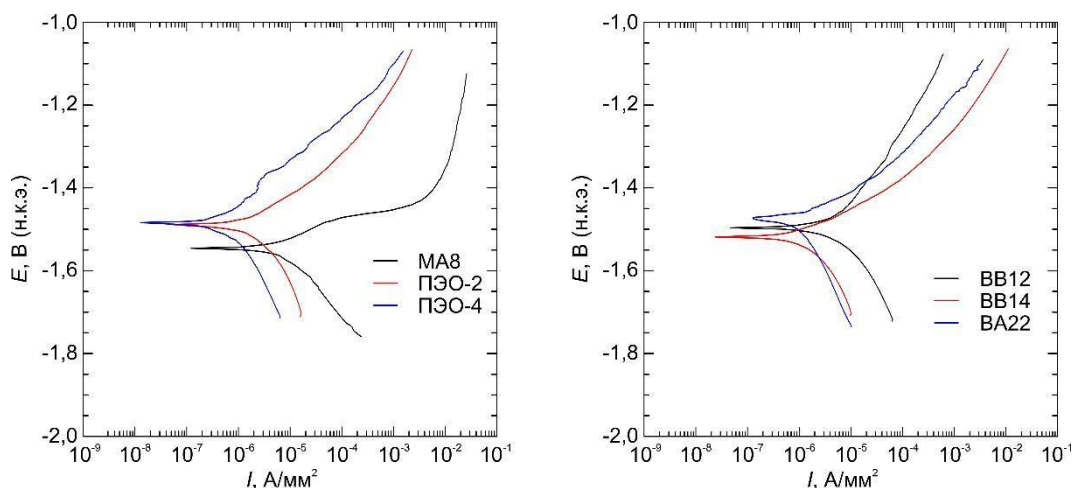


Рис. 1. Поляризационные кривые для образцов из магниевых сплавов МА8 без покрытия и с ПЭО-покрытиями, сформированными в различных электролитах.

Fig. 1. Polarization curves for MA8 magnesium alloy samples without coating and with PEO coatings formed in various electrolytes.

Внедрение частиц бора в состав ПЭО-покрытие на магниевом сплаве негативно сказывается на его защитных характеристиках, однако значения плотности тока коррозии и поляризационного сопротивления по-прежнему значительно превосходят соответствующие параметры материала без покрытия.

Таблица 2. Коррозионные характеристики исследуемых образцов.

Table 2. Corrosion characteristics of the studied samples.

Образец	I_C , А/см ²	E_C , В	R_p , Ом см ²
МА8	$3,25 \cdot 10^{-6}$	-1,55	$5,52 \cdot 10^3$
ПЭО-2	$2,65 \cdot 10^{-6}$	-1,49	$1,28 \cdot 10^4$
ПЭО-4	$5,58 \cdot 10^{-7}$	-1,48	$7,79 \cdot 10^4$
ВВ12	$6,07 \cdot 10^{-6}$	-1,50	$1,04 \cdot 10^4$
ВВ14	$1,31 \cdot 10^{-6}$	-1,52	$1,75 \cdot 10^4$
ВА22	$1,43 \cdot 10^{-6}$	-1,47	$2,01 \cdot 10^4$

Поляризационное сопротивление образцов, формируемых в гальваностатическом режиме,

более чем на 50 % превосходит данный параметр для металла без покрытия. Покрытия, формируемые в потенциодинамическом режиме, превосходят по показателям коррозионной стойкости сплав МА8 без покрытия более чем на 1 порядок величины. Таким образом, можно сделать вывод, что формирование борсодержащих покрытий на магниевом сплаве МА8 улучшает коррозионную стойкость материала (рис. 1, табл. 3).

На рисунках 2, 3 представлены импедансные спектры в виде диаграмм Бode и Найквиста. Диаграмма Найквиста для магниевых сплавов без покрытия имеет вид полуокружности в области высоких и средних частот, характеризующей емкостной характер границы раздела электрод/электролит (рис. 2). Структурное моделирование предполагаемых процессов на базе экспериментальных данных электрохимической импедансной спектроскопии основывается на системном подходе, при котором исследуемый объект рассматривается как эквивалентная электрическая схема, включающая в себя элементы, характеризующие фазовую границу раздела электрод / электролит. При составлении эквивалентных электрических схем в

данной работе использован элемент постоянной фазы *CPE* (*constant phase element*) вместо идеального конденсатора, поскольку моделируемые этим элементом слои гетерогенны по структуре и составу.

Диаграммы Найквиста для ПЭО-покрытий имеют вид двух полуокружностей. Обе полуокружности описывают зависимости емкостного характера и также связаны со структурой ПЭО-покрытий. Таким образом, граница раздела ПЭО-покрытие / электролит может быть

адекватно смоделирована эквивалентной электрической схемой (ЭЭС) с двумя *R-CPE*-цепочками (рис. 4). Так, полуокружность, расположенная в области высоких частот, обусловлена наличием у ПЭО-покрытий внешней пористой части, в то время как вторая, на средних частотах, характеризует тонкий беспористый подслои. Элемент R_1-CPE_1 описывает пористую, а элемент R_2-CPE_2 – беспористую части ПЭО-покрытий [25].

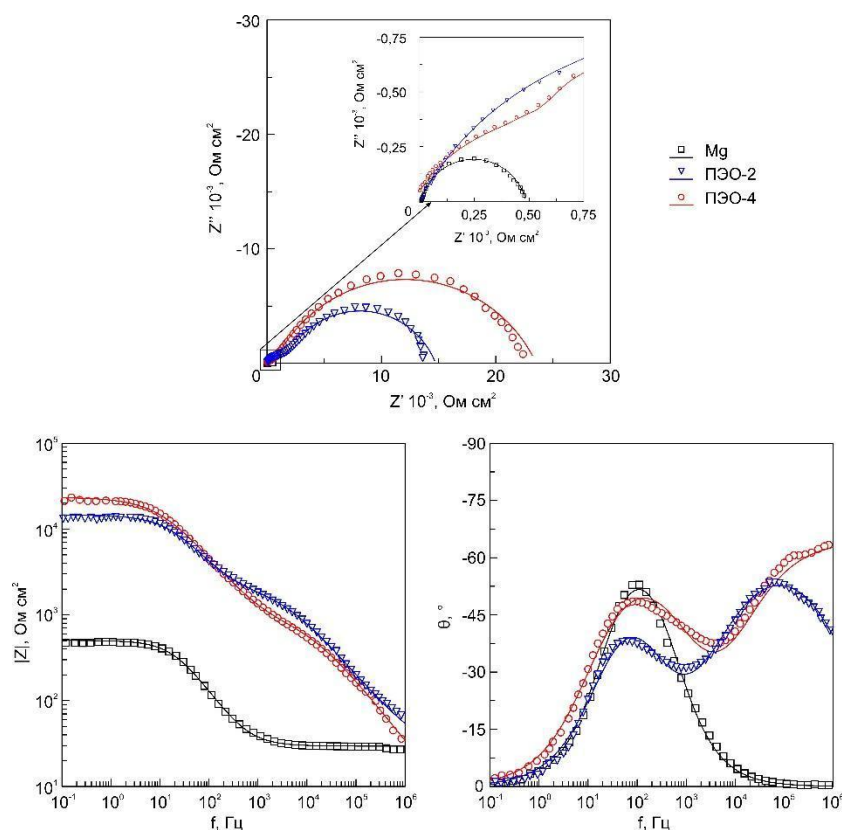


Рис. 2. Импедансные спектры (Диаграммы Найквиста и Боде) образцов из магниевого сплава МА8 без покрытия и с ПЭО-покрытием, формируемым в силикатно-фторидном электролите в гальваностатическом (ПЭО-2) или потенциодинамическом (ПЭО-4) режиме.

Fig. 2. Impedance spectra (Nyquist and Bode diagrams) of MA8 magnesium alloy samples without coating and with a PEO coating formed in a silicate-fluoride electrolyte in galvanostatic (PEO-2) or potentiodynamic (PEO-4) mode.

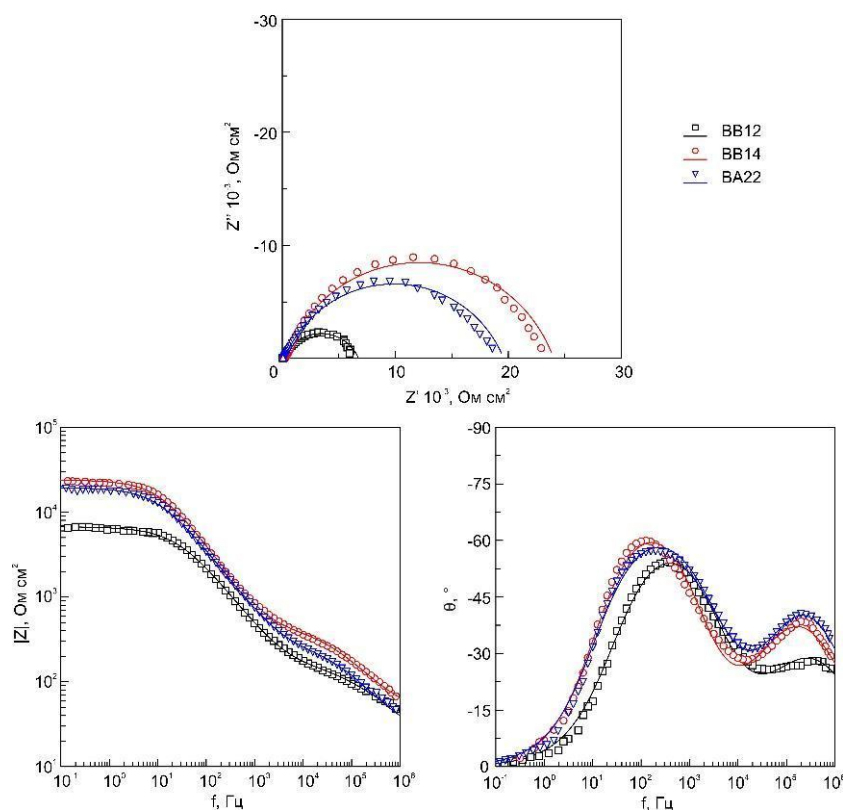


Рис. 3. Импедансные спектры (Диаграммы Найквиста и Боде) для образцов с ПЭО-покрытиями, формируемыми в различных режимах в электролитах, содержащих частицы бора в кристаллическом и аморфном состоянии.

Fig. 3. Impedance spectra (Nyquist and Bode diagrams) for samples with PEO coatings formed in various modes in electrolytes containing boron particles in a crystalline and amorphous state.

Таблица 3. Расчетные параметры элементов ЭЭС для образцов, формируемых в различных режимах и электролитах.

Table 3. Calculated parameters of the EES elements for samples formed in various modes and electrolytes.

Образец	$R_1, \text{ Ом см}^2$	CPE_1		$R_2, \text{ Ом см}^2$	CPE_2	
		$Q_1, \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ с}^n$	n_1		$Q_2, \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ с}^n$	n_2
МА8	-	-	-	$4,8 \cdot 10^{-2}$	$3,3 \cdot 10^{-5}$	0,85
ПЭО-2	$2,2 \cdot 10^3$	$4,6 \cdot 10^{-7}$	0,70	$1,3 \cdot 10^4$	$1,6 \cdot 10^{-6}$	0,79
ПЭО-4	$9,8 \cdot 10^2$	$3,8 \cdot 10^{-7}$	0,72	$2,3 \cdot 10^4$	$1,6 \cdot 10^{-6}$	0,73
ВВ12	$1,5 \cdot 10^2$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	0,66	$9,6 \cdot 10^3$	$2,2 \cdot 10^{-6}$	0,77
ВВ14	$4,2 \cdot 10^2$	$4,9 \cdot 10^{-7}$	0,70	$2,4 \cdot 10^4$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	0,82
ВА22	$2,5 \cdot 10^2$	$3,7 \cdot 10^{-7}$	0,74	$1,9 \cdot 10^4$	$1,7 \cdot 10^{-6}$	0,76

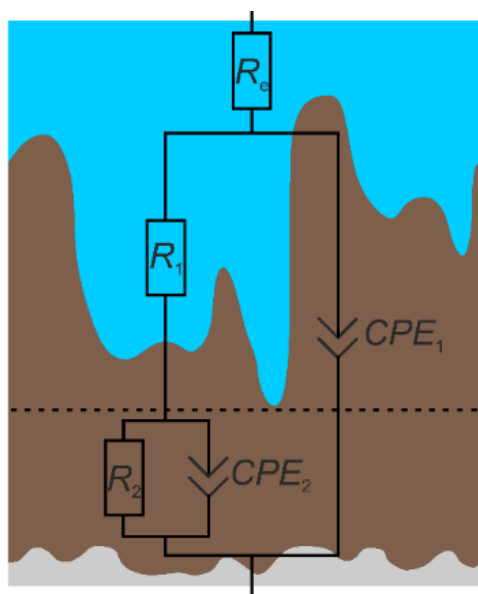


Рис. 4. Модель структуры ПЭО-покрытий на магниевом сплаве МА8 и соответствующая эквивалентная электрическая схема, используемая для моделирования экспериментальных импедансных спектров.

Fig. 4. A model of the structure of PEO coatings on magnesium alloy MA8 and a corresponding equivalent electrical circuit used to simulate experimental impedance spectra.

Анализ диаграммы Боде для формируемых ПЭО-покрытий также свидетельствует о наличии двух минимумов фазового угла: в области высоких $f = 10^5\text{--}10^6$ Гц (θ от -30 до -60°) и средних частот $f = 10^2\text{--}10^3$ Гц.

Все покрытия имеют схожие значения параметров ЭЭС, что обусловлено характерными особенностями строения ПЭО-покрытий. Низкие значения предэкспоненциального множителя Q_1 указывают на наличие толстого пористого оксидного слоя покрытий, а значения n_1 меньше 1 указывают на его гетерогенность. Напротив, более высокие значения Q_2 и n_2 свидетельствуют о большей однородности и меньшей толщине внутреннего беспористого

подслоя ПЭО-покрытий. Причем, учитывая близкие значения параметра $Q_2 = (1,6\text{--}2,2) \cdot 10^{-6} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$ для всех видов покрытий (полученных в гальваностатическом и в потенциодинамическом режимах), можно сделать вывод, что по значениям толщина беспористого подслоя для исследуемых ПЭО-покрытий близка (табл. 2).

Все покрытия, формируемые в гальваностатическом режиме, вне зависимости от состава электролита, практически не различимы по коррозионной стойкости (R_p около $1,0\text{--}2,0 \cdot 10^4 \text{ Ом см}^2$, табл. 2). Вероятно, это связано с большой пористостью и крупным размером пор внешнего слоя (табл. 3), в результате чего наибольший вклад в защитные характеристики вносит внутренний беспористый подслей, который для всех покрытий имеет примерно одинаковую толщину (CPE_2 , табл. 3). Данный вывод также подтверждается результатами расчета параметров элементов ЭЭС (значения R_2 на 1–2 порядка выше R_1), а также результатами предыдущих исследований [25–27].

Для покрытий, формируемых в одном электролите в разных режимах, характерны более высокие значения R_2 и n_2 при потенциодинамическом режиме, на основании чего можно сделать вывод, что в потенциодинамическом режиме формирования структура покрытий является более плотной, несмотря на меньшую толщину (табл. 2).

В данной работе было исследовано распределение значений микротвердости по толщине формируемых ПЭО-покрытий. В данном случае наибольший интерес представляло влияние внедрения частиц бора на величину микротвердости покрытий. На рисунке 5 представлены графики распределения микротвердости по толщине ПЭО-покрытий, формируемых в гальваностатическом режиме в силикатно-фторидном электролите без частиц бора (ПЭО-2), с частицами кристаллического бора (BB12) и аморфного (BA22).

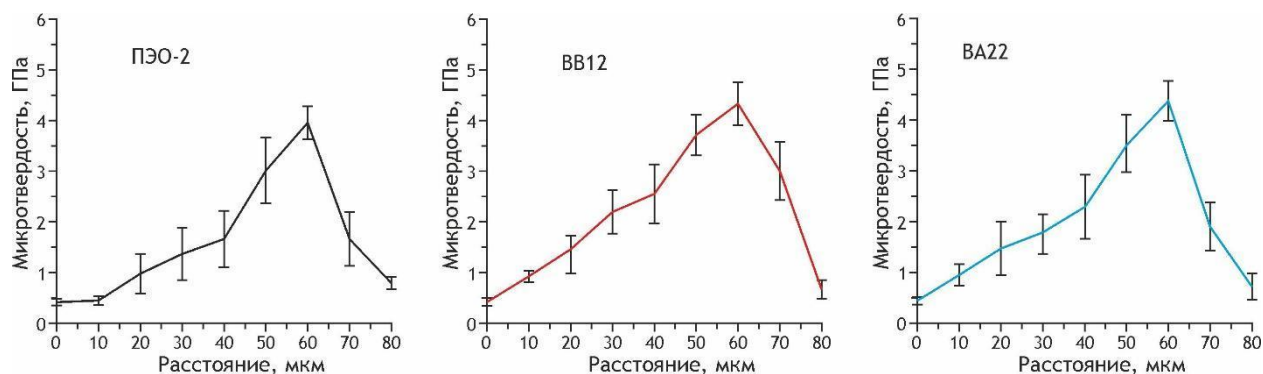


Рис. 5. Распределение значений микротвердости по толщине ПЭО-покрытий, формируемых в гальваностатическом режиме в силикатно-фторидном электролите без частиц бора (ПЭО-2), с частицами кристаллического бора (BB12) и аморфного (BA22).

Fig. 5. The distribution of microhardness values over the thickness of PEO coatings formed in galvanostatic mode in a silicate-fluoride electrolyte without boron particles (PEO-2), with particles of crystalline boron (BB12) and amorphous (BA22).

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что внедрение частиц бора в состав ПЭО-слоя повышает микротвердость внешней части гетерооксидных слоев. Так, на глубине 40 мкм от поверхности универсальная микротвердость ПЭО-покрытия без частиц бора, составляет порядка 1,6 ГПа, в то время как покрытия с частицами бора имеют значения более 2,5 ГПа. Покрытия, содержащие частицы бора, имеют величину универсальной микротвердости на 10–12 % выше, чем покрытия без частиц. Соответственно, можно сделать вывод, что внедрение частиц бора положительно сказывается на механических свойствах ПЭО-покрытий, формируемых на магниевом сплаве МА8.

Заключение

Методами электрохимической импедансной спектроскопии и потенциодинамической поляризации было установлено, что при потенциодинамическом режиме формирования антикоррозионные свойства покрытий выше, чем при гальваностатическом, что связано со различиями в структуре покрытий. Внедрение частиц бора в состав покрытий позволяет улучшать механические свойства: универсальная микротвердость покрытий с частицами превышает на 10–12 % величины данного параметра для базовых ПЭО-покрытий.

Список литературы

1. Simchen F. et al. Introduction to Plasma Electrolytic Oxidation – An Overview of the Process and Applications // Coatings 2020, Vol. 10, Page 628. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2020. Vol. 10, № 7. P. 628.
2. Lu X. et al. Plasma electrolytic oxidation coatings with particle additions – A review // Surf. Coatings Technol. 2016. Vol. 307. P. 1165–1182.
3. Barati Darband G. et al. Plasma electrolytic oxidation of magnesium and its alloys: Mechanism, properties and applications // J. Magnes. Alloy. Elsevier B.V., 2017. Vol. 5, № 1. P. 74–132.
4. Mashtalyar D.V et al. Hard wearproof PEO-coatings formed on Mg alloy using TiN nanoparticles // Appl. Surf. Sci. 2020. Vol. 503. P. 144062.
5. Lee K.M. et al. Evaluation of plasma temperature during plasma oxidation processing of AZ91 Mg alloy through analysis of the melting behavior of incorporated particles // Electrochim. Acta. 2012. Vol. 67. P. 6–11.
6. Chaharmahali R., Fattah-alhosseini A., Babaei K. Surface characterization and corrosion behavior of calcium phosphate (Ca-P) base composite layer on Mg and its alloys using plasma electrolytic oxidation (PEO): A review // Journal of Magnesium and Alloys. National Engg. Research Center for Magnesium Alloys, 2021. Vol. 9, № 1. P. 21–40.
7. Gnedenkov S.V. et al. Formation and electrochemical properties of the superhydrophobic

nanocomposite coating on PEO pretreated Mg-Mn-Ce magnesium alloy // *Surf. Coatings Technol.* Elsevier B.V., 2013. Vol. 232. P. 240–246.

8. Fattah-alhosseini A., Chaharmahali R. Enhancing corrosion and wear performance of PEO coatings on Mg alloys using graphene and graphene oxide additions: A review // *FlatChem.* Elsevier B.V., 2021. Vol. 27.

9. Molaei M., Babaei K., Fattah-alhosseini A. Improving the wear resistance of plasma electrolytic oxidation (PEO) coatings applied on Mg and its alloys under the addition of nano-and micro-sized additives into the electrolytes: A review // *J. Magnes. Alloy.* Elsevier, 2020.

10. Chaharmahali R. et al. Improving surface characteristics of PEO coatings of Mg and its alloys with zirconia nanoparticles: a review // *Appl. Surf. Sci. Adv.* Elsevier B.V., 2021. Vol. 6. P. 100131.

11. Mashtalyar D.V. et al. Influence of ZrO₂/SiO₂ nanomaterial incorporation on the properties of PEO layers on Mg-Mn-Ce alloy // *J. Magnes. Alloy.* Elsevier, 2021.

12. Arunnellaiappan T. et al. Fabrication of corrosion resistant hydrophobic ceramic nanocomposite coatings on PEO treated AA7075 // *Ceram. Int.* Elsevier Ltd and Techna Group S.r.l., 2018. Vol. 44, № 1. P. 874–884.

13. Hakimizad A. et al. The effect of pulse waveforms on surface morphology, composition and corrosion behavior of Al₂O₃ and Al₂O₃/TiO₂ nano-composite PEO coatings on 7075 aluminum alloy // *Surf. Coatings Technol.* Elsevier, 2017. Vol. 324. P. 208–221.

14. Mingo B. et al. Incorporation of halloysite nanotubes into forsterite surface layer during plasma electrolytic oxidation of AM50 Mg alloy // *Electrochim. Acta.* Pergamon, 2019. Vol. 299. P. 772–788.

15. Mingo B. et al. Enhanced Corrosion Resistance of AZ91 Alloy Produced by Semisolid Metal Processing // *J. Electrochem. Soc.* IOP Publishing, 2015. Vol. 162, № 4. P. C180–C188.

16. Arrabal R. et al. Role of alloyed Nd in the microstructure and atmospheric corrosion of as-cast magnesium alloy AZ91 // *Corros. Sci.* Elsevier, 2015. Vol. 97. P. 38–48.

17. Arrabal R. et al. Coating formation by plasma electrolytic oxidation on ZC71/SiC/12p-T6 magnesium metal matrix composite // *Appl. Surf. Sci.* 2009. Vol. 255, № 9. P. 5071–5078.

18. Lu X. et al. Plasma electrolytic oxidation coatings on Mg alloy with addition of SiO₂ parti-

cles // *Electrochim. Acta.* 2016. Vol. 187. P. 20–33.

19. Amaravathy P. et al. Bioactive HA/TiO₂ coating on magnesium alloy for biomedical applications // *Ceram. Int.* 2014. Vol. 40, № 5. P. 6617–6630.

20. Huang K.-Y. et al. Effects of various treatment procedures and pulse power modes on the photoelectric efficiency of Ti-PEO photocatalysts // *Mater. Chem. Phys.* 2021. Vol. 270. P. 124705.

21. Герасименко М.С. и др. Морфология и состав борсодержащих ПЭО-покрытий на сплаве магния МА8 // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения.* 2025. Т. 22, № 1. С. 42–55.

22. Song X. et al. The effect of pulse frequency on the electrochemical properties of micro arc oxidation coatings formed on magnesium alloy // *J. Magnes. Alloy.* 2013. Vol. 1, № 4. P. 318–322.

23. Aljohani J.L. et al. Backpropagation of Levenberg Marquardt artificial neural networks for wire coating analysis in the bath of Sisko fluid // *Ain Shams Eng. J.* 2021.

24. Egorkin V.S. et al. Increasing thickness and protective properties of PEO-coatings on aluminum alloy // *Surf. Coatings Technol.* 2018. Vol. 334. P. 29–42.

25. Mashtalyar D.V. et al. New approach to formation of coatings on Mg–Mn–Ce alloy using a combination of plasma treatment and spraying of fluoropolymers // *J. Magnes. Alloy.* Elsevier, 2021.

26. Sinebryukhov S.L. et al. PEO-coating/substrate interface investigation by localised electrochemical impedance spectroscopy // *Surf. Coatings Technol.* 2010. Vol. 205, № 6. P. 1697–1701.

27. Terrones M. Carbon nanotubes: synthesis and properties, electronic devices and other emerging applications // *Int. Mater. Rev.* 2004. Vol. 49, № 6. P. 325–377.

Информация об авторах

М.С. Герасименко – инженер Института химии ДВО РАН.

С.Н. Сучков – инженер Института химии ДВО РАН.

И.М. Иминецкий – кандидат химических наук, старший научный сотрудник Института химии ДВО РАН.

К.В. Надараиа – кандидат химических наук, старший научный сотрудник Института химии ДВО РАН.

Д.В. Машталяр – доктор химических наук, заведующий лабораторией композиционных покрытий биомедицинского назначения ИХ ДВО РАН.

С.Л. Синебрюхов – член-корреспондент РАН, доктор химических наук, заместитель директора Института химии ДВО РАН.

С.В. Гнеденков – член-корреспондент РАН, доктор химических наук, директор Института химии ДВО РАН.

References

1. Simchen, F., Sieber, M., Kopp, A., & Lampke, T. (2020). Introduction to plasma electrolytic oxidation – An overview of the process and applications. *Coatings*, 10(7), 628.
2. Lu, X., Mohedano, M., Blawert, C., Matykina, E., Arrabal, R., Kainer, K.U., & Zheludkevich, M.L. (2016). Plasma electrolytic oxidation coatings with particle additions—A review. *Surface and Coatings Technology*, 307, 1165-1182.
3. Darband, G.B., Aliofkhazraei, M., Hamghalam, P., & Valizade, N. (2017). Plasma electrolytic oxidation of magnesium and its alloys: Mechanism, properties and applications. *Journal of Magnesium and Alloys*, 5(1), 74-132.
4. Mashtalyar, D.V., Sinebryukhov, S.L., Imshinetskiy, I.M., Gnedenkov, A.S., Nadaraia, K.V., Ustinov, A.Y., & Gnedenkov, S.V. (2020). Hard wearproof PEO-coatings formed on Mg alloy using TiN nanoparticles. *Applied Surface Science*, 503, 144062.
5. Lee, K.M., Lee, B.U., Yoon, S.I., Lee, E.S., Yoo, B., & Shin, D.H. (2012). Evaluation of plasma temperature during plasma oxidation processing of AZ91 Mg alloy through analysis of the melting behavior of incorporated particles. *Electrochimica Acta*, 67, 6-11.
6. Chaharmahali, R., Fattah-alhosseini, A., & Babaei, K. (2021). Surface characterization and corrosion behavior of calcium phosphate (Ca-P) base composite layer on Mg and its alloys using plasma electrolytic oxidation (PEO): A review. *Journal of Magnesium and Alloys*, 9(1), 21-40.
7. Gnedenkov, S.V., Egorkin, V.S., Sinebryukhov, S.L., Vyaliy, I.E., Pashinin, A.S., Emelyanenko, A. M., & Boinovich, L.B. (2013). Formation and electrochemical properties of the superhydrophobic nanocomposite coating on PEO pretreated Mg–Mn–Ce magnesium alloy. *Surface and Coatings Technology*, 232, 240-246.
8. Fattah-alhosseini, A., & Chaharmahali, R. (2021). Enhancing corrosion and wear performance of PEO coatings on Mg alloys using graphene and graphene oxide additions: A review. *FlatChem*, 27, 100241.
9. Molaei, M., Babaei, K., & Fattah-alhosseini, A. (2021). Improving the wear resistance of plasma electrolytic oxidation (PEO) coatings applied on Mg and its alloys under the addition of nano-and micro-sized additives into the electrolytes: A review. *Journal of Magnesium and Alloys*, 9(4), 1164-1186.
10. Chaharmahali, R., Fattah-alhosseini, A., Nouri, M., & Babaei, K. (2021). Improving surface characteristics of PEO coatings of Mg and its alloys with zirconia nanoparticles: A review. *Applied Surface Science Advances*, 6, 100131.
11. Mashtalyar, D.V., Imshinetskiy, I.M., Nadaraia, K.V., Gnedenkov, A.S., Sinebryukhov, S.L., Ustinov, A.Y., ... & Gnedenkov, S.V. (2022). Influence of ZrO₂/SiO₂ nanomaterial incorporation on the properties of PEO layers on Mg-Mn-Ce alloy. *Journal of Magnesium and Alloys*, 10(2), 513-526.
12. Arunnellaiappan, T., Arun, S., Hariprasad, S., Gowtham, S., Ravisankar, B., & Rameshbabu, N. (2018). Fabrication of corrosion resistant hydrophobic ceramic nanocomposite coatings on PEO treated AA7075. *Ceramics International*, 44(1), 874-884.
13. Hakimizad, A., Raeissi, K., Golozar, M.A., Lu, X., Blawert, C., & Zheludkevich, M.L. (2017). The effect of pulse waveforms on surface morphology, composition and corrosion behavior of Al₂O₃ and Al₂O₃/TiO₂ nano-composite PEO coatings on 7075 aluminum alloy. *Surface and Coatings Technology*, 324, 208-221.
14. Mingo, B., Guo, Y., Němcová, A., Gholinia, A., Mohedano, M., Sun, M., ... & Yerokhin, A. (2019). Incorporation of halloysite nanotubes into forsterite surface layer during plasma electrolytic oxidation of AM50 Mg alloy. *Electrochimica Acta*, 299, 772-788.
15. Mingo, B., Arrabal, R., Mohedano, M., Pardo, A., Matykina, E., & Rivas, A. (2015). Enhanced corrosion resistance of AZ91 alloy produced by semisolid metal processing. *Journal of The Electrochemical Society*, 162(4), C180.
16. Arrabal, R., Mingo, B., Pardo, A., Matykina, E., Mohedano, M., Merino, M. C., ... & Maroto, A. (2015). Role of alloyed Nd in the microstructure and atmospheric corrosion of as-cast magnesium alloy AZ91. *Corrosion Science*, 97, 38-48.
17. Arrabal, R., Matykina, E., Skeldon, P., & Thompson, G.E. (2009). Coating formation by plasma electrolytic oxidation on ZC71/SiC/12p-T6 magnesium metal matrix composite. *Applied surface science*, 255(9), 5071-5078.

18. Lu, X., Blawert, C., Huang, Y., Ovri, H., Zheludkevich, M.L., & Kainer, K.U. (2016). Plasma electrolytic oxidation coatings on Mg alloy with addition of SiO₂ particles. *Electrochimica Acta*, 187, 20-33.
19. Amaravathy, P., Sathyanarayanan, S., Sowndarya, S., & Rajendran, N. (2014). Bioactive HA/TiO₂ coating on magnesium alloy for biomedical applications. *Ceramics international*, 40(5), 6617-6630.
20. Huang, K.Y., Chen, H.D., Xie, Z.D., & Liang, C.J. (2021). Effects of various treatment procedures and pulse power modes on the photoelectric efficiency of Ti-PEO photocatalysts. *Materials Chemistry and Physics*, 270, 124705.
21. Gerasimenko, M.S., Suchkov, S.N., Imshinetsky, I.M., Nadaraia, K.V., Mashtalyar, D.V., Gerasimenko, A.V., Sinebryukhov, S.L. & Gnedenkov, S.V. (2025) Morphology and composition of boron-containing PEO-coatings on mg alloy MA8. *Fundamental'nye problemy sovremenogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 22(1), 42-55. (In Russ.).
22. Song, X., Lu, J., Yin, X., Jiang, J., & Wang, J. (2013). The effect of pulse frequency on the electrochemical properties of micro arc oxidation coatings formed on magnesium alloy. *Journal of Magnesium and Alloys*, 1(4), 318-322.
23. Aljohani, J.L., Alaidarous, E.S., Raja, M.A. Z., Alhothuali, M.S., & Shoaib, M. (2021). Backpropagation of Levenberg Marquardt artificial neural networks for wire coating analysis in the bath of Sisko fluid. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(4), 4133-4143.
24. Egorkin, V.S., Gnedenkov, S.V., Sinebryukhov, S.L., Vyaliy, I.E., Gnedenkov, A.S., & Chizhikov, R.G. (2018). Increasing thickness and protective properties of PEO-coatings on aluminum alloy. *Surface and coatings Technology*, 334, 29-42.
25. Mashtalyar, D.V., Nadaraia, K.V., Imshinetskiy, I.M., Sinebryukhov, S.L., & Gnedenkov, S. V. (2022). New approach to formation of coatings on Mg–Mn–Ce alloy using a combination of plasma treatment and spraying of fluoropolymers. *Journal of Magnesium and Alloys*, 10(4), 1033-1050.
26. Sinebryukhov, S.L., Gnedenkov, A.S., Mashtalyar, D.V., & Gnedenkov, S.V. (2010). PEO-coating/substrate interface investigation by localised electrochemical impedance spectroscopy. *Surface and Coatings Technology*, 205(6), 1697-1701.
27. Terrones, M. (2004). Carbon nanotubes: synthesis and properties, electronic devices and other emerging applications. *International materials reviews*, 49(6), 325-377.

Information about the authors

M.S. Gerasimenko – engineer of the Institute of Chemistry, FEB RAS.

S.N. Suchkov – engineer of the Institute of Chemistry, FEB RAS.

I.M. Imshinetsky – PhD of Chemical Sciences, Senior Researcher Officer of the Institute of Chemistry, FEB RAS.

K.V. Nadaraia – PhD of Chemical Sciences, Senior Researcher Officer of the Institute of Chemistry, FEB RAS.

D.V. Mashtalyar – Doctor of Chemical Sciences, Head of the Laboratory of composite coatings for biomedical applications of Institute of Chemistry, FEB RAS.

S.L. Sinebryukhov – Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Chemical Sciences, Deputy Director of the Institute of Chemistry, FEB RAS.

S.V. Gnedenkov – Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Chemical Sciences, Director of the Institute of Chemistry, FEB RAS.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 25.04.2025; одобрена после рецензирования 22.04.2025; принята к публикации 05.05.2025.

The article was received by the editorial board on 25 Apr. 2025; approved after reviewing 22 Apr. 2025; accepted for publication 05 May 2025.