

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 538.9+54.03+620.197

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.03.003

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ, ФОРМИРУЕМЫХ НА VT1-0

Евгений Алексеевич Белов¹, Сергей Николаевич Сучков²,
Игорь Михайлович Имшинецкий³, Константин Вахтангович Надараиа⁴,
Дмитрий Валерьевич Машталяр⁵

¹⁻⁵ Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук, проспект 100-летия
Владивостока, 159, Владивосток 690022, Россия

¹ belov_eal@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9734-1482>

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

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

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

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

Аннотация. В данной работе исследованы композитные покрытия, сформированные на титане VT1-0. Методом плазменного электролитического оксидирования (ПЭО) был получен базовый оксидный слой, который в дальнейшем модифицировали ультрадисперсным политетрафторэтиленом (УПТФЭ) с помощью метода распыления. Изучено влияние кратности нанесения полимерного слоя на электрохимические, трибологические и адгезионные характеристики покрытий. Показано, что применение полимерной обработки позволяет значительно повысить защитные свойства системы. Установлено, что с увеличением числа кратности обработки от 1 до 3 плотность тока коррозии снижается с $1,6 \cdot 10^{-8}$ до $7,2 \cdot 10^{-9}$ А/см², а поляризационное сопротивление возрастает с $1,6 \cdot 10^6$ до $9,5 \cdot 10^6$ Ом·см² относительно базового ПЭО-слоя. Методом электрохимической импедансной спектроскопии подтверждено, что полимер эффективно заполняет поры оксидного слоя, особенно на образцах с двумя и тремя кратностями обработки. Наибольшая износостойкость зафиксирована для образца с трехкратным нанесением: износ снизился более чем в 1500 раз по сравнению с базовым ПЭО-покрытием. Адгезионные испытания показали, что полимерная пленка увеличивает критическую нагрузку при царапании на 43% для образца с трехкратным нанесением. Полученные результаты демонстрируют высокую эффективность комбинированного метода ПЭО и распыления УПТФЭ для создания функциональных покрытий на титане.

Ключевые слова: плазменное электролитическое оксидирование; титан VT1-0; ультрадисперсный политетрафторэтилен; композиционные покрытия; защитные свойства; коррозионная стойкость; износостойкость; адгезия; метод распыления; электрохимическая импедансная спектроскопия.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института химии Дальневосточного отделения Российской академии наук № FWFN(0205)-2025-0001).

Для цитирования: Белов Е.А., Сучков С.Н., Имшинецкий И.М., Надараиа К.В., Машталяр Д.В. Электрохимические и механические свойства композиционных покрытий, формируемых на VT1-0 // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2026. Т. 23, № 3. С. 304-312. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.03.003.

Original article

ELECTROCHEMICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF COMPOSITE COATINGS FORMED ON VT1-0

Evgeniy A. Belov¹, Sergey N. Suchkov², Igor M. Imshinetsky³, Konstantine V. Nadaraia⁴,
Dmitry V. Mashtalyar⁵

¹⁻⁵ Institute of Chemistry FEB RAS, 159 Pr. 100-Letiya Vladivostoka, Vladivostok, 690022, Russia

¹belov_eal@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9734-1482>

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

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

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

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

Abstract. In this work, composite coatings formed on VT1-0 titanium were investigated. A base oxide layer was obtained using plasma electrolytic oxidation (PEO), which was subsequently modified with superdispersed polytetrafluoroethylene (SPTFE) by a spraying method. The effect of the number of polymer layer application cycles on the electrochemical, tribological, and adhesive characteristics of the coatings was studied. It was shown that polymer treatment significantly enhances the protective properties of the system. It was found that with an increase in the number of treatment cycles from 1 to 3, the corrosion current density decreases from $1.6 \cdot 10^{-8}$ to $7.2 \cdot 10^{-9}$ A/cm², and the polarization resistance increases from $1.6 \cdot 10^6$ to $9.5 \cdot 10^6$ Ohm×cm² compared to the base PEO layer. Electrochemical impedance spectroscopy confirmed that the polymer effectively fills the pores of the oxide layer, especially on samples subjected to two and three treatment cycles. The highest wear resistance was recorded for the sample with triple-layer application: the wear rate decreased by more than 1500 times compared to the base PEO coating. Adhesion tests showed that the polymer film increases the critical scratch load by 43% for the sample with triple application. The obtained results demonstrate the high efficiency of the combined PEO and SPTFE spraying method for creating functional coatings on titanium.

Keywords: plasma electrolytic oxidation, VT1-0 titanium, superdispersed polytetrafluoroethylene, composite coatings, protective properties, corrosion resistance, wear resistance, adhesion, spraying method, electrochemical impedance spectroscopy.

Acknowledgements: This research was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State Assignment №. FWFN(0205)-2025-0001 to the Institute of Chemistry, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences).

For citation: Belov E.A., Suchkov S.N., Imshinetsky I.M., Nadaraia K.V. & Mashtalyar D.V. (2026). Electrochemical and mechanical properties of composite coatings formed on VT1-0. *Fundamental'nye problemy sovremennoy materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 23(3), 304-312. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.03.003.

Введение

Покрытия, формируемые методом плазменного электролитического оксидирования на металлах и сплавах, обладают развитой поверхностью и хорошей адгезией к подложке, что делает их подходящей основой для создания композиционных слоев [1–6], включающих химически стойкие материалы, например фторполимеры. Создание фторполимерных композиционных покрытий (КП) на основе ПЭО позволяет повысить защитные свойства и расширить область применения изделий. На поверхности титановых сплавов такие покрытия снижают токи коррозии [7,8], повышают коррози-

онную стойкость имплантатов [5,9], обладают антинакипными [10,11] и гидрофобными [12] свойствами. На алюминиевых сплавах формируются износостойкие антипригарные покрытия [13], а на стали Ст3 – антикоррозионные [14].

Известны различные способы внедрения полимеров: механический (трибоэлектрический) [11,15] погружение в суспензию [16,17], электрофоретическое осаждение [18], одностадийное формирование КП с добавлением фторполимера в электролит [19,20]. Наиболее технологичным оказался метод распыления [21], позволяющий обрабатывать большие площади.

Таким образом, полимерсодержащие КП на основе ПЭО актуальны для различных металлов и сплавов. В настоящей работе исследовано сочетание плазменного электролитического оксидирования и последующего внедрения фторорганического материала методом распыления.

Материалы и методики исследования

В качестве подложки использовались пластины из технически чистого титана марки BT1-0 (масс. %: 0,25 Fe; 0,12 Si; 0,07 C; 0,12 O; 0,04 N; 0,01 H; остальное – Ti) размером $30 \times 20 \times 1,5$ мм³. Перед формированием покрытий образцы шлифовались и обезжиривались. Процесс оксидирования образцов проводился в фосфатном электролите, содержащем 25 г/л $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, в комбинированном монопольном режиме, сочетающем две последовательные потенциодинамические стадии. На первой стадии происходил подъем напряжения с 30 до 270 В со скоростью 2 В/с, с целью формирования на границе раздела электролит/металл плазменных микроразрядов, в каналах которых происходит формирование ПЭО-слоя. Далее напряжение плавно снижали до 230 В со скоростью 0,07 В/с. Во время процесса ПЭО температуру электролита (8 °С) контролировали с помощью охлаждающей установки ChillerSmart H150-3000 (LabTech Group, Великобритания).

Для создания композиционных покрытий использовали ультрадисперсный политетрафторэтилен (УПТФЭ) марки «Форум®», полученный термоградиентным синтезом из фторопласта Ф-4 [22]. Размер частиц – от 0,2 до 1,5 мкм (средний 0,35 мкм). Готовили 8 мас. % суспензию УПТФЭ в изопропиловом спирте.

Суспензию распыляли краскопультом под давлением 400 кПа (расстояние до образца 20 см) от 1 до 3 раз по 5 секунд с промежуточной термообработкой при 315 °С в течение 15 мин после каждой кратности нанесения. Образцы обозначены как КП1, КП2 и КП3 (для 1, 2 и 3 кратного нанесения фторполимера соответственно).

Электрохимические исследования выполнены в трёхэлектродной ячейке на установке VersaSTAT MC (Princeton Applied Research, США) в 3,5 мас. % растворе NaCl. Электрод сравнения – насыщенный каломельный электрод (н.к.э.). Рабочая площадь образца – 1 см².

Перед измерениями образцы выдерживали в электролите 15 мин. Потенциодинамические поляризационные кривые записывали от $E_c - 0,15$ В до $E_c + 0,50$ В со скоростью 5 мВ/с. Импедансные спектры снимали при потенциале свободной коррозии в диапазоне частот 0,01 Гц – 1 МГц, амплитуда сигнала 10 мВ. Обработку данных проводили с помощью программы ZView 4.

Трибологические испытания выполнены на установке Tribometer (CSM Instruments, Швейцария) в режиме сухого трения при нагрузке 10 Н, скорости скольжения 50 мм/с, диаметр трека 10 мм, контртело – корундовый шар ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) диаметром 10 мм. Испытание проводили до полного истирания покрытия до металлической подложки, что контролировали по изменению коэффициента трения и визуальному осмотру дорожки износа. Профиль трека износа измеряли профилометром Surtronic 25.

Адгезию оценивали методом царапания на установке Revetest ScratchTester (алмазный индентор Роквелла, радиус 200 мкм, нагрузка от 1 до 40 Н, скорость нарастания 0,2 Н/с, длина царапины 5 мм).

Результаты и их обсуждение

Образцы титана BT1-0 без покрытия обладают высокой коррозионной стойкостью благодаря пассивации и образованию оксидной плёнки Ti_xO_y . Однако основной проблемой при применении титановых материалов является не их собственная коррозия, а возможность образования гальванопары с менее коррозионно-стойкими металлами и сплавами. Нанесение ПЭО-покрытия приводит к снижению плотности тока коррозии и сдвигу потенциала коррозии в положительную сторону (рис. 1, табл. 1). Дальнейшее нанесение УПТФЭ улучшает защитные свойства: для КП3 плотность тока коррозии составляет $7,2 \cdot 10^{-9}$ А/см², что ниже, чем у ПЭО-покрытия ($1,7 \cdot 10^{-8}$ А/см²), а поляризационное сопротивление возрастает до $9,5 \cdot 10^6$ Ом·см².

Анализ данных электрохимической импедансной спектроскопии (рис. 2) исследуемых композиционных покрытий на титане подтверждает результаты потенциодинамической поляризации, свидетельствующие о существенном влиянии кратности обработки фторорганической дисперсией базового ПЭО-слоя на характер переноса заряда на границе раздела фаз

поверхность/электролит. Спектр для образца без покрытия может быть описан с применением электрической эквивалентной схемы с одной $R-CPE$ -цепочкой (рис. 2, б), где R_2 – сопротивление переносу заряда, а CPE_2 – емкость слоя естественного оксида.

На диаграмме Боде (зависимость фазового угла от частоты) у образца без покрытия наблюдается перегиб в области средних частот. Спектр для ПЭО-покрытий описывается двух- $R-CPE$ -цепочечной ЭЭС (рис. 2, б), где элемент R_2-CPE_2 моделирует внутренний беспористый подслой ПЭО-покрытия, а R_1-CPE_1 – внешний пористый слой. Такая же ЭЭС применялась для описания КП2 и КП3, только R_1-CPE_1 моделирует пористый слой, заполненный полимером, а R_2-CPE_2 – внутренний слой, толщина которого увеличилась за счет полимера, находящегося на дне пор. Нестандартную форму имел спектр для КП1, моделирование которого проводилось с применением ЭЭС с тремя $R-CPE$ -цепочками (рис. 2, в), что обусловлено наличием трех выраженных временных констант на диаграмме Боде (рис. 2, з).

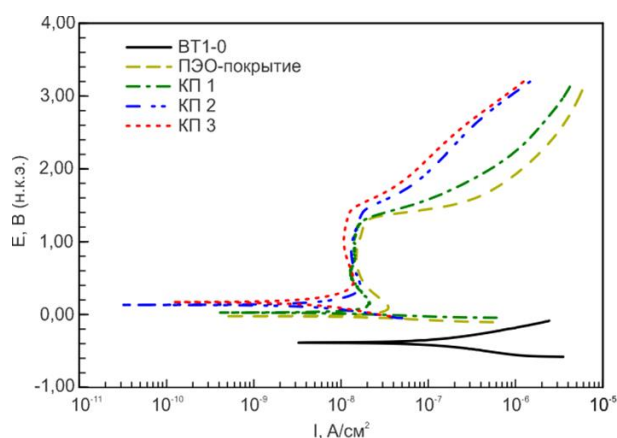


Рис.1. Потенциодинамические поляризационные кривые образцов титана VT1-0 с разными видами поверхностной обработки.

Fig. 1. Potentiodynamic polarization curves of VT1-0 titanium samples with different types of surface treatment.

Таблица 1. Коррозионные характеристики образцов (E_c , В; I_c , А/см²; R_p , Ом·см²) из титана марки VT1-0 с разными видами поверхностной обработки.

Table 1. Corrosion characteristics of samples (E_c , V; I_c , A/cm²; R_p , Ohm·cm²) made of titanium grade VT1-0 with different types of surface treatment.

Вид покрытия	E_c (н.к.э.)	I_c	R_p
Без покрытия	-0,38	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$3,5 \cdot 10^5$
ПЭО-покрытие	-0,07	$1,7 \cdot 10^{-8}$	$1,1 \cdot 10^6$
КП1	0,03	$1,6 \cdot 10^{-8}$	$1,6 \cdot 10^6$
КП2	0,13	$8,2 \cdot 10^{-9}$	$7,2 \cdot 10^6$
КП3	0,13	$7,2 \cdot 10^{-9}$	$9,5 \cdot 10^6$

Изменение вида спектра в зависимости от кратности нанесения композиционного полимерсодержащего слоя позволяет сделать вывод о более сложной структуре таких покрытий по сравнению с базовым ПЭО-слоем. Для образца КП1 отмечается третья временная константа, обусловленная запечатыванием полимером пор с воздухом: в таком случае R_1-CPE_1 моделирует границу раздела электролит / полимерная пленка / воздушное пространство, имеющую высокое сопротивление R_1 переносу заряда (табл. 2). В свою очередь R_3-CPE_3 моделирует наличие полимера внутри пористой части покрытия. Ту же часть полимерного материала, которая заполнила поры и дефекты, без образования воздушных карманов, позволил смоделировать элемент R_2-CPE_2 .

Для образцов КП2 и КП3 третьей временной константы не наблюдается, что может быть обусловлено заполнением пористой части ПЭО-слоя полимером и, соответственно, отсутствием воздуха в запечатанных порах. На это косвенно указывает увеличение значений R_1 и уменьшение Q_1 , что возможно при росте толщины полимерного слоя (табл. 2). Динамика изменения значений параметров R_2 и Q_2 указывает на увеличение толщины беспористого подслоя композиционных покрытий, что обусловлено проникновением полимера ко дну пор. Уменьшение значений n_2 (табл. 2) для КП2 и КП3 является следствием увеличения гетерогенности пористого ПЭО-слоя, обусловленного разной проводимостью полимера и соединений ПЭО-покрытия, что также свидетельствует о частичном и/или полном заполнении пор УПТФЭ.

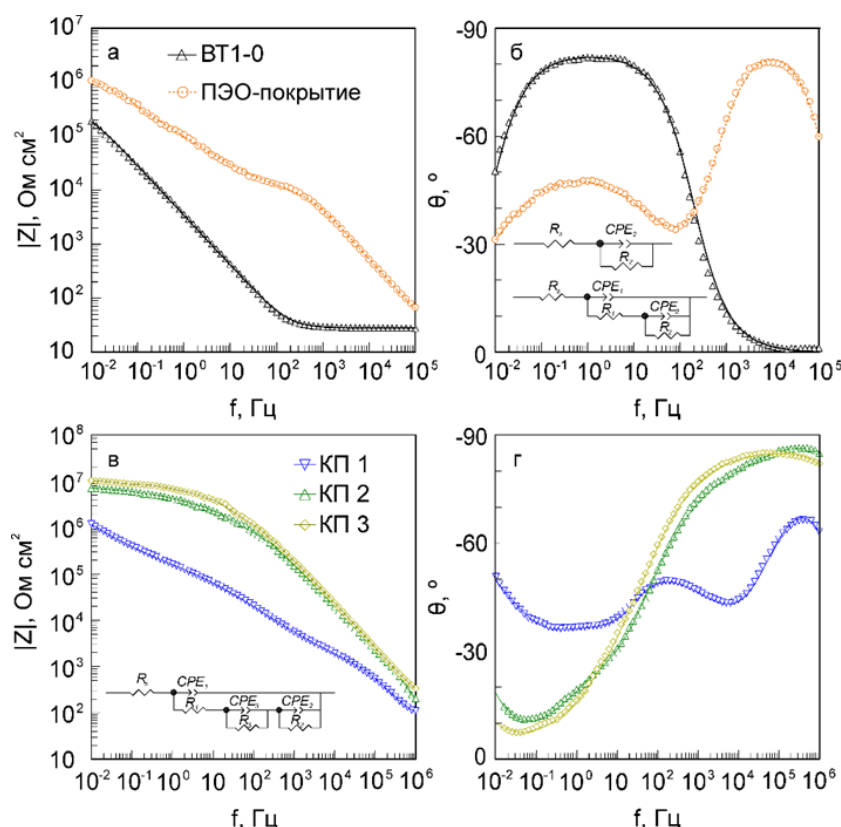


Рис.2. Диаграммы Бode для образцов из титана марки VT1-0 без покрытия и с ПЭО-покрытием (а, б), с композиционными покрытиями: КП1, КП2, КП3 (в, г). Символами обозначены экспериментальные данные, линией – теоретические кривые, рассчитанные в соответствии с предложенными ЭЭС.

Fig. 2. Bode diagrams for samples of titanium grade VT1-0 without coating and with PEO coating (a, b), with composite coatings: CC1, CC2, CC3 (c, d). The symbols indicate experimental data, the line indicates theoretical curves calculated in accordance with the proposed EES.

По совокупности проведенных электрохимических исследований на покрытиях, формируемых технически чистом титане VT1-0, можно сделать вывод, что обработка ПЭО-

покрытий фторорганическими дисперсиями позволяет значительно улучшать коррозионные свойства данных материалов.

Таблица 2. Расчетные параметры эквивалентных электрических схем (R , Ом·см²; Q , Ом⁻¹·см⁻²·сⁿ) для образцов из технически чистого титана марки VT1-0 с разными видами поверхностной обработки

Table 2. Calculated parameters of equivalent electrical circuits (R , Ohm·cm²; Q , Ohm⁻¹ cm⁻²·sⁿ) for samples of technically pure titanium grade VT1-0 with different types of surface treatment

Вид покрытия	R_1	CPE_1		R_2	CPE_2		R_3	CPE_3	
		Q_1	n_1		Q_2	n_2		Q_3	n_3
Без покрытия	—	—	—	$3,4 \cdot 10^5$	$5,4 \cdot 10^{-5}$	0,92	—	—	—
ПЭО-покрытие	$9,4 \cdot 10^3$	$4,1 \cdot 10^{-8}$	0,96	$2,1 \cdot 10^6$	$3,5 \cdot 10^{-6}$	0,58	—	—	—
КП1	$1,4 \cdot 10^3$	$1,2 \cdot 10^{-8}$	0,88	$1,9 \cdot 10^4$	$7,7 \cdot 10^{-7}$	0,83	$3,5 \cdot 10^5$	$2,6 \cdot 10^{-6}$	0,51
КП2	$6,2 \cdot 10^4$	$7,2 \cdot 10^{-10}$	0,98	$5,7 \cdot 10^6$	$1,1 \cdot 10^{-8}$	0,67	—	—	—
КП3	$1,4 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^{-9}$	0,95	$1,2 \cdot 10^7$	$3,4 \cdot 10^{-8}$	0,38	—	—	—

Несмотря на высокую прочность титана, одну из наиболее существенных проблем при

использовании титана в узлах трения представляет явление контактного схватывания – повышается вероятность заклинивания механизма и,

как следствие, его разрушения. Таким образом, поверхность титана также нуждается в модификации и улучшении трибологических характеристик.

Согласно анализу трибологических данных (табл. 3), базовый ПЭО-слой на поверхности титана имеет низкий ресурс и разрушается уже после 36 оборотов, что соответствует высокой скорости изнашивания. Внедрение политетрафторэтилена многократно увеличивает срок службы покрытий: для КП1 разрушение наступает при 18300-29700 оборотах, для КП2 – при 30400-33500, для КП3 – при 28200-29300 оборотах. Рассчитанный удельный объёмный износ снижается как минимум в 370 раз для КП1 и более чем в 1500 раз для КП3 по сравнению с базовым ПЭО-покрытием (табл. 3).

Наличие на поверхности композиционных покрытий плотной пленки фторполимера обеспечивает износостойкость всего материала. Увеличение количества полимера и, как следствие, толщины полимерной пленки обеспечивает наиболее длительное истирание. Таким образом, износостойкость композиционных покрытий увеличивается с ростом количества фторполимера, внедряемого в базовый ПЭО-слой.

Таблица 3. Величина удельного объёмного износа образцов из технически чистого титана VT1-0 с разными видами поверхностной обработки

Table 3. The amount of wear of samples made of technically pure titanium VT1-0 with different types of surface treatment.

Вид покрытия	Удельный объёмный износ, $\text{мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$
ПЭО-покрытие	$2,4 \cdot 10^{-2}$
КП1	$6,8 \cdot 10^{-5}$
КП2	$1,8 \cdot 10^{-5}$
КП3	$1,6 \cdot 10^{-5}$

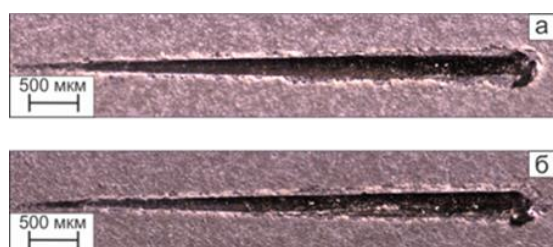


Рис. 3. Оптические изображения царапин, нанесенных на поверхность ПЭО-покрытия (а) и композиционных покрытий: КП1 (б), КП2 (в), КП3 (г), полученных на титане марки VT1-0.

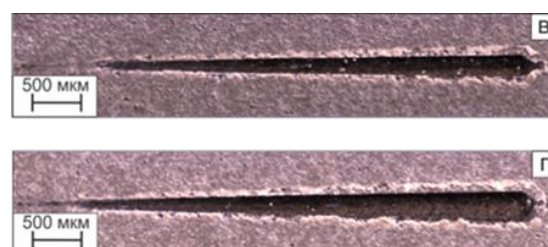
Fig. 3. Optical images of scratches applied to the surface of the PEO coating (a) and composite coatings: CC1 (b), CC 2 (c), CC 3 (d), obtained on titanium grade VT1-0.

Сформированное покрытие на поверхности титанового сплава обладает высокой адгезией к металлической подложке (табл. 4). Значение $L_{C2} = 13,8 \text{ Н}$ при величине $L_{C3} = 30,6 \text{ Н}$ указывает на высокую адгезию оксидного слоя (табл. 4). Для КП1 сила, при которой происходило смещение поверхностных слоев относительно металлической подложки, возросла до $15,2 \text{ Н}$, что на 10 % выше, чем у базового ПЭО-покрытия. Для КП2 и КП3 величина адгезии L_{C3} сопоставима в пределах ошибки и превосходит значения, полученные для ПЭО-покрытия, на 27 %. Таким образом, увеличение количества внедряемого полимера позволяет увеличить значения L_{C2} и L_{C3} для композиционных покрытий. Так, значения L_{C2} демонстрируют повышение нагрузки до $19,7 \text{ Н}$, что на 43 % выше, чем у базового ПЭО-слоя. Подобное изменение характеристик вызвано увеличением количества фторполимерного материала на поверхности. Наличие УПТФЭ в поверхностных структурах за счет низкого коэффициента трения полимера обеспечивает скольжение индентора, что и обуславливает повышение исследуемых параметров (рис. 3).

Таблица 4. Адгезионные свойства покрытий, полученных на образцах из титана VT1-0

Table 4. Adhesive properties of coatings obtained on samples of titanium VT1-0.

Покрытие	$L_{C2}, \text{ Н}$	$L_{C3}, \text{ Н}$
ПЭО-покрытие	$13,8 \pm 0,2$	$30,6 \pm 0,4$
КП1	$15,2 \pm 0,3$	$36,8 \pm 0,4$
КП2	$18,6 \pm 0,2$	$38,2 \pm 0,5$
КП3	$19,7 \pm 0,4$	$38,8 \pm 0,6$



Заключение

В результате работы показано, что метод распыления суспензии ультрадисперсного политетрафторэтилена на предварительно сформированное ПЭО-покрытие позволяет эффективно создавать композиционные слои на титане ВТ1-0. Установлено, что увеличение числа кратности нанесения до трёх приводит к значительному повышению коррозионной стойкости (снижение I_c до $7,2 \cdot 10^{-9}$ А/см²), износостойкости (снижение износа более чем в 1500 раз) и адгезии (увеличение на 27%). Полученные композиционные покрытия перспективны для применения в узлах трения и агрессивных средах.

Список литературы

1. Бузник В.М. Новые наноразмерные и микроразмерные объекты на основе политетрафторэтилена // Российские нанотехнологии. 2009. Вып. 4. С. 35–41.
2. Бузник В.М. Состояние отечественной химии фторполимеров и возможные перспективы развития // Российский химический журнал (Журнал Российского химического общества им. Д.И. Менделеева). 2008. Вып. LII, № 3. С. 7–12.
3. Логинов Б.А. Удивительный мир фторполимеров. М.: ООО “Девятый элемент,” 2009. 168 с.
4. Ebnesajjad S., Morgan R.A. Fluoropolymer additives. 2012. 296 p.
5. Mingo B. et al. Influence of sealing post-treatments on the corrosion resistance of PEO coated AZ91 magnesium alloy // Appl. Surf. Sci. 2018. Vol. 433. P. 653–667
6. Wang J., Tang J., He Y. Top coating of low-molecular weight polymer MALPB used for enhanced protection on anodized AZ31B Mg alloys // J. Coatings Technol. 2010. Vol. 7, № 6. P. 737–746.
7. Гнеденков С.В., Синебрюхов С.Л., Сергиенко В.И. Композиционные многофункциональные покрытия на металлах и сплавах, формируемые плазменным электролитическим оксидированием. Владивосток: Дальнаука, 2013. 460 с.
8. Гнеденков С.В. и др. Композиционные полимерсодержащие защитные слои на титане // Коррозия: Материалы, Защита. 2007. № 7. С. 37–42.
9. Гнеденков С.В. и др. Композиционные защитные покрытия на поверхности никелида титана // Коррозия: Материалы, Защита. ООО Наука и технологии. 2007. № 2. С. 20–25.
10. Минаев А.Н. и др. Антиаккипные композитные покрытия, получаемые с помощью плазменно-электролитической технологии // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2011. Вып 1, № 6. С. 31–49.
11. Гнеденков С.В. и др. Перенос заряда на границе раздела антиаккипный композиционный слой/электролит // Коррозия: Материалы, Защита. 2006. № 5. С. 27–33.
12. Гнеденков С.В. и др. Гидрофобные свойства композиционных фторполимерных покрытий на титане // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2011. Вып. 47, № 1. С. 86–94.
13. Патент 2068037. Способ получения композиционных покрытий на алюминий и его сплавах / Гнеденков С.В. и др. заявл. 29.11.1993; опубл. 20.10.1996.
14. Гнеденков С.В. и др. Композиционные защитные покрытия на поверхности стали // Коррозия: Материалы, Защита. ООО Наука и технологии, 2007. № 11. С. 27–33.
15. Gnedenkov S. V. et al. Composite polymer-containing protective layers on titanium // Prot. Met. 2008. Vol. 44, № 7. P. 704–709.
16. Khokhryakov Y. V., Butyagin P.I., Mamaev A.I. Formation of dispersed particles during plasma oxidation // J. Mater. Sci. 2005. Vol. 40, № 11. P. 3007–3008.
17. Nadaraia K.V. et al. Protective coatings formed by PEO and fluorine-containing compound // Defect Diffus. Forum. 2018. Vol. 386. P. 343–348.
18. Gnedenkov S.V. et al. Composite fluoropolymer coatings on Mg alloys formed by plasma electrolytic oxidation in combination with electrophoretic deposition // Surf. Coatings Technol. 2015. Vol. 283. P. 347–352.
19. Руднев В.С. и др. Гибридные политетрафторэтилен-оксидные покрытия на алюми-

нии и титане, сформированные методом плазменно-электролитического оксидирования // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2013. Вып. 49. С. 95–103.

20. Руднев В.С. и др. Получение плазменно-электролитическим оксидированием политетрафторполиэтилен- или графитсодержащих оксидных слоев на алюминии и титане и их строение // Журнал Физической Химии. 2013. Вып. 87, № 6. С. 1031–1036.

21. Mashtalyar D. et al. Polymer-Containing Layers Formed by PEO and Spray-Coating Method // Mater. Today Proc. 2019. Vol. 11. P. 150–154.

22. Патент 1775419. Способ переработки политетрафторэтилена / Цветников А.К., Уминский А.А. № 4872647; заявл. 10.09.1990; опубл. 15.11.1992.

Информация об авторах

Е.А. Белов – младший научный сотрудник Института химии ДВО РАН.

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

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

К.В. Надараца – 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.

References

1. Buznik V.M. New nanosized and micro-sized objects based on polytetrafluoroethylene. Rossiiskie nanotekhnologii, 2009, vol. 4, pp. 35–41. (In Russ.)

2. Buznik V.M. The state of domestic fluoropolymer chemistry and possible development prospects. Rossiiskii khimicheskii zhurnal, 2008, vol. LII, no. 3, pp. 7–12. (In Russ.)

3. Loginov B.A. The amazing world of fluoropolymers. Moscow: ООО "Devyatyi element" Publ., 2009. 168 p. (In Russ.)

4. Ebnesajjad S., Morgan R.A. Fluoropolymer additives. Kidlington: William Andrew, 2012. 296 p.

5. Mingo B., et al. Influence of sealing post-treatments on the corrosion resistance of PEO coated AZ91 magnesium alloy. Applied Surface Science, 2018, vol. 433, pp. 653–667.

6. Wang J., Tang J., He Y. Top coating of low-molecular weight polymer MALPB used for enhanced protection on anodized AZ31B Mg alloys. Journal of Coatings Technology and Research, 2010, vol. 7, no. 6, pp. 737–746.

7. Gnedenkov S.V., Sinebryukhov S.L., Sergienko V.I. Composite multifunctional coatings on metals and alloys formed by plasma electrolytic oxidation. Vladivostok: Dal'nauka Publ., 2013. 460 p. (In Russ.)

8. Gnedenkov S.V., et al. Composite polymer-containing protective layers on titanium. Korrozija: materialy, zashhita, 2007, no. 7, pp. 37–42. (In Russ.)

9. Gnedenkov S.V., et al. Composite protective coatings on the surface of titanium nickelide. Korrozija: materialy, zashhita, 2007, no. 2, pp. 20–25. (In Russ.)

10. Minaev A.N., et al. Antiscale composite coatings obtained using plasma-electrolytic technology. VestnikInzhenernoishkolyDal'nevostochnogofederal'nogouniversiteta, 2011, vol. 1, no. 6, pp. 31–49. (In Russ.)

11. Gnedenkov S.V., et al. Charge transfer at the antiscale composite layer/electrolyte interface. Korrozija: materialy, zashhita, 2006, no. 5, pp. 27–33. (In Russ.)

12. Gnedenkov S.V., et al. Hydrophobic properties of composite fluoropolymer coatings on titanium. Fizikohimija poverhnosti i zashhita materialov, 2011, vol. 47, no. 1, pp. 86–94. (In Russ.)

13. Gnedenkov S.V., et al. (1996) Method for producing composite coatings on aluminum and its alloys. (Patent No.2068037 Russia). (In Russ.)

14. Gnedenkov S.V., et al. Composite protective coatings on steel surface. Korrozija: materialy, zashhita, 2007, no. 11, pp. 27–33. (In Russ.)

15. Gnedenkov S.V., et al. Composite polymer-containing protective layers on titanium. Protection of Metals, 2008, vol. 44, no. 7, pp. 704–709.

16. Khokhryakov Y.V., Butyagin P.I., Mamaev A.I. Formation of dispersed particles during plasma oxidation. *Journal of Materials Science*, 2005, vol. 40, no. 11, pp. 3007–3008.
17. Nadaraia K.V., et al. Protective coatings formed by PEO and fluorine-containing compound. *Defect and Diffusion Forum*, 2018, vol. 386, pp. 343–348.
18. Gnedenkov S.V., et al. Composite fluoro-polymer coatings on Mg alloys formed by plasma electrolytic oxidation in combination with electrophoretic deposition. *Surface and Coatings Technology*, 2015, vol. 283, pp. 347–352.
19. Rudnev V.S., et al. Hybrid polytetrafluoroethylene-oxide coatings on aluminum and titanium formed by plasma electrolytic oxidation. *Fiziko-himija poverhnosti i zashhita materialov*, 2013, vol. 49, no. 1, pp. 95–103. (In Russ.)
20. Rudnev V.S., et al. Formation of polytetrafluoroethylene- or graphite-containing oxide layers on aluminum and titanium by plasma electrolytic oxidation and their structure. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2013, vol. 87, no. 6, pp. 1031–1036.
21. Mashtalyar D., et al. Polymer-Containing Layers Formed by PEO and Spray-Coating Method. *Materials Today: Proceedings*, 2019, vol. 11, pp. 150–154.
22. Tsvetnikov, A.K., & Uminsky, A.A. (1992). Method for processing polytetrafluoroethylene (Patent No. 1775419 Russia). (In Russ.).

Information about the authors

E.A. Belov – junior researcher 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.

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

Статья поступила в редакцию 29.05.2026; одобрена после рецензирования 07.09.2026; принята к публикации 14.09.2026.

The article was received by the editorial board on 29 May 2026; approved after reviewing 07 Sep. 2026; accepted for publication 14 Sep. 2026.