

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 538.9+532.64+691.175

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.03.002

ВЛИЯНИЕ КРАТНОСТИ НАНЕСЕНИЯ УЛЬТРАДИСПЕРСНОГО ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА НА СМАЧИВАЕМОСТЬ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ТИТАНЕ

Евгений Алексеевич Белов¹, Сергей Николаевич Сучков²,
Игорь Михайлович Имшинецкий³, Константин Вахангович 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 nadaraiakv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7835-2231>

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

Аннотация. В работе исследованы композиционные покрытия, сформированные на технически чистом титане марки ВТ1-0 методом плазменного электролитического оксидирования с последующим нанесением ультрадисперсного политетрафторэтилена (УПТФЭ) методом распыления и термической обработкой. Актуальность работы обусловлена необходимостью создания гидрофобных защитных покрытий для металлов, эксплуатируемых в агрессивных средах. Установлено влияние количества наносимой суспензии УПТФЭ (1, 2 или 3 цикла распыления) на морфологию, смачиваемость и поверхностную энергию композиционных покрытий. Установлено, что однократное нанесение УПТФЭ обеспечивает равномерное заполнение пор без дефектов, контактный угол $131,3 \pm 0,6^\circ$ и минимальный гистерезис смачивания ($39,0 \pm 0,5^\circ$). Поверхностная энергия покрытия, полученная однократным нанесением полимера, составляет $12,78 \pm 0,57$ мДж/м², что характерно для гидрофобных фторполимерных материалов. Двух- и трёхкратное нанесение приводит к росту внутренних напряжений, образованию трещин, отслоению полимерной пленки и снижению гидрофобности. Полученные результаты могут быть использованы при разработке защитных гидрофобных покрытий для титановых изделий, работающих в коррозионно-активных средах.

Ключевые слова: плазменное электролитическое оксидирование; титан ВТ1-0; ультрадисперсный политетрафторэтилен; смачиваемость; композиционные покрытия; гидрофобность; поверхностная энергия; гистерезис контактного угла; метод распыления.

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. Влияние кратности нанесения ультрадисперсного политетрафторэтилена на смачиваемость композиционных покрытий на титане // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2026. Т. 23, № 3. С. 295-303. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.03.002.

Original article

INFLUENCE OF THE MULTIPLICITY OF ULTRADISPERSE POLYTETRAFLUOROETHYLENE APPLICATION ON THE WETTABILITY OF PEO COATINGS ON TITANIUM

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/>

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

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

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

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

Abstract. The paper studies composite coatings formed on commercially pure titanium grade VT1-0 by plasma electrolytic oxidation followed by the application of superdispersed polytetrafluoroethylene (SPTFE) by spraying and heat treatment. The relevance of the work is determined by the need to create hydrophobic protective coatings for metals operated in aggressive environments. The effect of the applied SPTFE suspension amount (1, 2 or 3 spraying cycles) on the morphology, wettability and surface energy of the composite coatings is determined. It is established that a single application of SPTFE provides uniform filling of pores without defects, a contact angle of $131.3 \pm 0.6^\circ$ and a minimum wetting hysteresis ($39.0 \pm 0.5^\circ$). The surface energy of the coating obtained with a single polymer application is 12.78 ± 0.57 mJ/m², which is typical for hydrophobic fluoropolymer materials. Two or three applications lead to increased internal stress, crack formation, polymer film delamination, and a decrease in hydrophobicity. These results can be used in the development of protective hydrophobic coatings for titanium components operating in corrosive environments.

Keywords: plasma electrolytic oxidation, titanium VT1-0, superdispersed polytetrafluoroethylene, wettability, composite coatings, hydrophobicity, surface energy, contact angle hysteresis, spraying method.

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). Influence of the multiplicity of ultradisperse polytetrafluoroethylene application on the wettability of composite coatings on titanium. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 23(3), 295-303. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2026.03.002.

Введение

Внедрение полимерного материала в матрицу слоя, полученного методом плазменного электролитического оксидирования (ПЭО), как метод формирования композиционных покрытий декларируется в обширном перечне исследований, в которых рассматриваются наиболее значимые аспекты формирования композиционных покрытий на основе ПЭО-слоя с использованием полимеров [1–9].

Среди множества различных материалов, используемых для синтеза композиционных покрытий, одним из наиболее популярных является политетрафторэтилен (ПТФЭ) [10–12]. ПТФЭ представляет собой химически устойчивый полимер, обладающий широким диапазоном рабочих температур и демонстрирующий гидрофобные свойства [13, 14]. При формирова-

нии композиционного покрытия полимер растекается по поверхности ПЭО-слоя, заполняя поры и дефекты, при этом обеспечивая изоляцию металла подложки от взаимодействия с окружающей средой, а также увеличивая срок службы керамикоподобного слоя.

Важно упомянуть, что поверхность таких покрытий с фторполимерными материалами обладает гидрофобными свойствами, характеризующимися высокими значениями угла смачивания [15]. При этом контактный угол у таких покрытий намного выше, чем у гладкой поверхности ПТФЭ, что свидетельствует о влиянии морфологии полученных слоев на свойства поверхности. Для повышения гидрофобности поверхности были определены и опробованы методы формирования композиционных покрытий с такими фторорганическими материалами, как теломеры ТФЭ, которые обеспечили

поверхности гидрофобные свойства с контакт-ным углом выше 170° [4].

В результате наблюдений было отмечено изменение смачиваемости в зависимости от количества фторполимера на поверхности [16,17]. Кроме того, согласно СЭМ-анализу, отмечались и изменения в морфологии поверхности [17]. Происходящие при этом изменения обусловлены накоплением ПТФЭ на поверхности, что сначала обеспечивает покрытие всех неровностей, а после – заполнение дефектов и неровностей поверхности и получение гладкой полимерной плоскости.

Помимо фторорганических веществ для формирования композиционного слоя использовались золь-гели и другие вещества. Например, в работе [18] авторы представили самозалечивающиеся композиционные покрытия на основе ПЭО-слоя с внедрением в его состав золь-геля. Этим же коллективом проводились сравнительные исследования систем золь-геля для герметизации слоя ПЭО и обеспечения лучших защитных свойств [19]. В этом случае формируются противокоррозионные покрытия, так как золь-гели препятствуют проникновению агрессивной среды к металлу подложки.

Таким образом, целью настоящей работы является исследование влияния кратности нанесения суспензии ультрадисперсного политетрафторэтилена (1, 2 или 3 цикла распыления) на морфологию, смачиваемость и поверхностную энергию композиционных покрытий, сформированных на титане ВТ1-0 методом ПЭО, а также определение оптимального режима обработки для достижения максимальной гидрофобности и структурной однородности покрытия.

Материалы и методики исследования

В качестве подложки использовались пластины из технически чистого титана марки ВТ1-0 (масс. %: 0,25 Fe; 0,12 Si; 0,07 C; 0,12 O; 0,04 N; 0,01 H; остальное – Ti) размером $30 \times 20 \times 1,5 \text{ мм}^3$. 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 монополярном 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 микроархивов, 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°C) контро-

лировали с помощью охлаждающей установки ChillerSmart H150-3000 (LabTech Group, Великобритания).

Для создания композиционных покрытий (КП) в данной работе применяли ультрадисперсный политетрафторэтилен (УПТФЭ) торговой марки «Форум[®]», полученный методом термоградиентного синтеза из фторопласта марки Ф-4 [20]. Размер частиц УПТФЭ варьирует от 0,2 до 1,5 мкм (средний размер 0,35 мкм). С целью повышения технологичности нанесения композиционного слоя в данной работе использовали 8 масс. % суспензию порошка УПТФЭ в изопропиловом спирте.

Формирование композиционных покрытий осуществлялось методом распыления с помощью краскопульта суспензии ультрадисперсного политетрафторэтилена с последующей термической обработкой. Распыление производилось под давлением в 400 кПа, чтобы частицы УПТФЭ наносились на поверхность и проникали в поры, но не сдувались с поверхности потоком воздуха. Расстояние от сопла распылителя до образца составляло 20 см, чтобы распределение материала происходило на поверхности покрытия равномерным слоем. Распыление проводилось от 1 до 3 раз по 5 с каждое, с термической обработкой после каждого цикла нанесения полимера. Термическая обработка проводилась при температуре 315°C длительно-стью 15 мин. Полученные образцы обозначены как КП 1, КП 2 и КП 3 для 1, 2 и 3 циклов нанесения соответственно.

Смачиваемость полученных покрытий исследована методом сидячей капли при помощи прибора DSA100 (Krüss, Германия). Метод сидячей капли заключается в измерении оптического контактного угла (КУ) и используется для оценки смачивающих свойств локализованной области твердой поверхности.

Результаты и их обсуждение

На основе уже существующих исследований [1,2,4,5,21] были установлены режимы и электролитические системы для ПЭО на технически чистом титане марки ВТ1-0, что позволило разработать способ формирования матрицы, подходящей для создания на ее основе композиционных покрытий путем обработки базового ПЭО-слоя фторорганическими дисперсиями. В качестве способа обработки использовался метод распыления.

Анализ СЭМ-изображений поверхности ПЭО- и композиционных покрытий (рис. 1) показал полное заполнение пор на ПЭО-покрытии на титане. Однако при уже двухкратном нанесении УПТФЭ в полимерной пленке начинают формироваться дефекты. В случае КП 3 наблю-

дается отслоение полимерного слоя от ПЭО-покрытия. Поверхность ПЭО-покрытия отличается низкой шероховатостью и незначительной пористостью, что связано с малым размером пор. Благодаря этому даже небольшого количества полимера достаточно для образования тонкой пленки. Можно предположить, что дальнейшее увеличение количества наносимой

суспензии приводит к росту толщины полимерного слоя, что, вероятно, вызывает повышение внутренних напряжений в полимере при термообработке. Как следствие, это может приводить к образованию трещин в композиционном покрытии и, в конечном итоге, к его отслаиванию от ПЭО-основы.

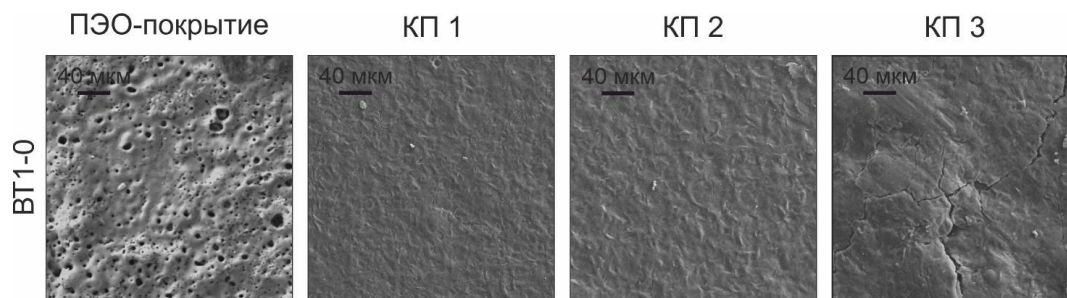


Рис.1. СЭМ-изображения поверхности ПЭО- и композиционных покрытий на титане марки VT1-0

Fig. 1. SEM images of the surface of PEO and composite coatings on titanium grade VT1-0

Результаты исследования смачиваемости образцов из технически чистого титана VT1-0 (без покрытий, с ПЭО-покрытием и композиционными покрытиями КП 1, КП 2, КП 3) представлены в табл. 1. ПЭО-покрытия на титане характеризуются меньшим размером пор и их низкой концентрацией. В результате контактные углы смачивания для титана и его ПЭО-покрытия практически одинаковы. Обработка ПЭО-покрытий фторполимером повышает гидрофобность титановых образцов, что связано с химической модификацией и созданием микро-/наношероховатости поверхности. Ана-

лиз смачиваемости композиционных покрытий не выявил значимых различий между титановыми образцами. Однако среди исследованных вариантов покрытие КП 1 (однократное нанесение УПТФЭ) демонстрирует оптимальные характеристики: минимальный разброс значений контактного угла ($\theta_{\text{КУ}}$) и наименьший показатель гистерезиса смачивания ($\theta_{\text{КУ}}$), что свидетельствует о его большей стабильности и однородности по сравнению с другими поверхностями.

Таблица 1. Параметры толщины и смачиваемости образцов из титана марки VT1-0 с разными видами поверхностной обработки

Table 1. Thickness and wettability parameters of VT1-0 titanium samples with different types of surface treatment

Вид поверхности	d , мкм	$\theta_{\text{КУ}}, ^\circ$	$\theta_{\text{Н}}, ^\circ$	$\theta_{\text{О}}, ^\circ$	$\theta_{\text{КУ}}, ^\circ$
VT1-0	7	$75,1 \pm 0,3$	—	—	—
ПЭО-покрытие	7	$75,2 \pm 1,4$	—	—	—
КП 1	8	$131,3 \pm 0,6$	$146,4 \pm 0,3$	$107,4 \pm 0,2$	$39,0 \pm 0,5$
КП 2	10	$130,2 \pm 2,9$	$138,4 \pm 0,4$	$97,7 \pm 0,2$	$40,7 \pm 0,6$
КП 3	7	$128,1 \pm 2,7$	$143,4 \pm 0,3$	$93,7 \pm 0,4$	$49,7 \pm 0,7$

Особенности микроструктуры ПЭО-покрытий на титане – незначительная шероховатость и ограниченная пористость с малым количеством мелких пор – приводят к тому, что композиционные покрытия на этом материале демонстрируют менее выраженные гидрофобные свойства (табл. 1). Однако даже в этих условиях покрытие КП 1 показывает результат

с контактным углом свыше 131° , что свидетельствует о его высокой гидрофобности. Интересно отметить, что при последовательном нанесении композиционных покрытий (КП 1 → КП 2 → КП 3) наблюдается четкая тенденция к снижению гидрофобности. Это проявляется в уменьшении среднего значения контактного угла, а также углов натекания и оттекания, что указывает на постепенное увеличение смачива-

емости поверхности. Такая закономерность может быть связана с изменением характеристик поверхности при многослойном нанесении покрытий.

Динамика изменения величины КУ и длины контактной линии для композиционных покрытий на титане представлена на рис. 2.

Экспериментальные данные показывают: фиксированное положение контактной линии при изменении объема капли свидетельствует о низкой подвижности жидкости на композиционных покрытиях. Это подтверждается максимальными значениями угла гистерезиса смачивания у всех исследуемых образцов. Наибольшие значения ГКУ зафиксированы для покрытий КП 3 на титане, что объясняется толстым полимерным слоем, что скрывает то, что объясняется толстым полимерным слоем, который скрывает морфологические особенности поверхности, в результате чего морфология стала близкой к гладкому слою фторполимера.

Свободная поверхностная энергия (СПЭ) количественно характеризует интенсивность химических и межмолекулярных взаимодействий на границе раздела твердого тела и жидкости. Данный параметр напрямую зависит от химического состава поверхности материала. Экспериментальные данные показывают, что для металлических поверхностей значения СПЭ составляют 33–44 мДж/м² (табл. 2), что

соответствует результатам других исследований [22]. Металлические поверхности являются высокоэнергетическими. Нанесение ПЭО-покрытий приводит к росту СПЭ благодаря образованию керамикоподобного слоя с гидроксильными группами на поверхности.

Анализ компонентного состава свободной поверхностной энергии выявил принципиальные различия между металлическими поверхностями и ПЭО-покрытиями. Для металлов (титана ВТ1-0) преобладающий вклад (84–87%) вносит дисперсионная составляющая, обусловленная ван-дер-ваальсовыми взаимодействиями (табл. 2). ПЭО-покрытия демонстрируют смачиваемость и СПЭ, близкие к значениям для металлической поверхности. Это объясняется сходством химического состава (оксидная природа как ПЭО-слоя, так и естественной оксидной пленки на титане) и особенностями структуры.

Обработка ПЭО-покрытий фторорганическими веществами приводит к значительному уменьшению величины поверхностной энергии, которая для всех исследуемых композиционных покрытий не превышала 16 мДж/м² (табл. 2). Уменьшение СПЭ обусловлено образованием плотной полимерной пленки на ПЭО-покрытии, на что в том числе указывают и крайне низкие значения полярной составляющей СПЭ, что характерно для фторполимеров.

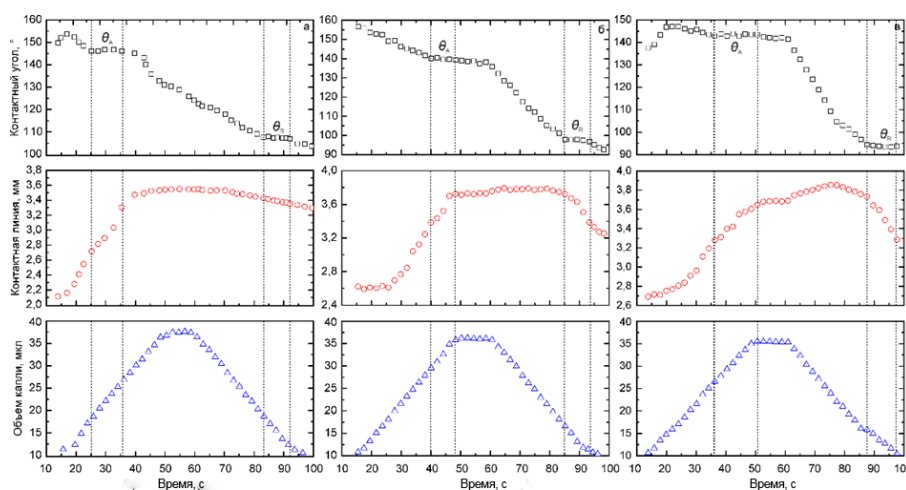


Рис.2. Графики изменения контактного угла (верхняя панель), длины контактной линии (средняя) и объема капли (нижняя) в процессе измерения углов натекания и оттекания на поверхности КП 1 (а), КП 2 (б) и КП 3 (в), сформированных на титане марки ВТ1-0

Fig. 2. Graphs of contact angle (top panel), contact line length (middle), and drop volume (bottom) during the measurement of advancing and receding angles on the surface of CC1 (a), CC2 (b) and CC3 (c) formed on VT1-0 titanium

Таблица 2. Значения контактных углов и поверхностной энергии для разных видов поверхности

Table 2. Contact angles and surface energy values for different surface types

Вид поверхности	$\theta_{\text{КУ}}, ^\circ$		γ_s^d , мДж/м ²	γ_s^p , мДж/м ²	γ_s , мДж/м ²
	H ₂ O	CH ₂ I ₂			
ВТ1-0	75,1 ± 0,3	43,7 ± 0,4	37,72 ± 0,23	5,73 ± 0,14	43,45 ± 0,37
ПЭО-покрытие	75,2 ± 1,4	40,7 ± 1,3	39,26 ± 0,67	5,31 ± 0,58	44,57 ± 1,24
КП 1	131,3 ± 0,6	90,6 ± 1,2	12,45 ± 0,50	0,33 ± 0,07	12,78 ± 0,57
КП 2	130,2 ± 2,9	99,3 ± 1,5	8,91 ± 0,54	0,02 ± 0,06	8,93 ± 0,60
КП 3	128,1 ± 2,7	96,8 ± 3,6	9,85 ± 1,41	0,01 ± 0,05	9,86 ± 1,46

Композиционные покрытия КП 1 демонстрируют значения поверхностной энергии в диапазоне 12–16 мДж/м² для всех исследованных металлических подложек. Наименьшие показатели СПЭ зафиксированы для титановых образцов, что коррелирует с более сглаженной морфологией их поверхности. Из этого можно сделать вывод, что структура и состав поверхности ПЭО-покрытия оказывают значительное влияние на данную величину. Открытые участки ПЭО-слоя и незаполненные полимером поры контактируют с тестовыми жидкостями и увеличивают СПЭ.

Значения СПЭ для КП 2 и КП 3 находятся в диапазоне 8–10 мДж/м². Эти показатели значительно (в 1,5 раза) ниже, чем у монолитного ПТФЭ (14,7 мДж/м²[23]), используемого в качестве эталонного материала. Подложка для низкоэнергетического полимерного слоя является высокоэнергетической, следовательно, в этом случае синергия исключена. Это согласуется с предположением о наличии иерархической структуры поверхности композиционных покрытий, смачиваемость которой соответствует состоянию Касси–Бакстера.

Таким образом, полученные значения контактных углов ($\geq 128^\circ$) для композиционных покрытий позволяют предположить, что смачивание происходит по механизму, описываемому моделью Касси–Бакстера. В данном состоянии (так называемое «состояние Касси») жидкость не проникает в поры и неровности шероховатой поверхности, а «висит» на их вершинах, оставляя под собой воздушные зазоры. Это приводит к значительному увеличению кажущегося контактного угла по сравнению с гладкой поверхностью того же материала. Следовательно, измеренные значения КУ отражают не

только химическую природу поверхности (фторполимер), но и ее морфологические особенности (наличие микро- и нанорельефа), что делает их некорректными для прямого расчета поверхностной энергии по классическим моделям, разработанным для гладких поверхностей. Однако, учитывая, что поверхность композиционных покрытий почти полностью состоит из ПТФЭ, можно приближенно считать, что поверхностная энергия таких покрытий сопоставима по величине с поверхностной энергией гладкого фторполимера.

Заключение

Исследованы композиционные покрытия, сформированные на технически чистом титане ВТ1-0 методом плазменного электролитического оксидирования в фосфатном электролите с последующим распылением суспензии УПТФЭ. Однократное нанесение фторполимера является оптимальным: формируется гидрофобная поверхность со статическим контактным углом $131,3^\circ$ и минимальным гистерезисом смачивания $39,0^\circ$. Увеличение числа циклов обработки до трех вызывает рост внутренних напряжений, трещинообразование и отслоение пленки, что снижает контактный угол до $128,1^\circ$ и увеличивает гистерезис до $49,7^\circ$. Модификация поверхности образца КП 1 обеспечивает снижение свободной поверхностной энергии титана с 43,45 до 12,78 мДж/м² за счет формирования плотного полимерного слоя с низкой полярной составляющей.

Список литературы

1. Gnedenkov S., Sinebryukhov S. Composite Polymer Containing Coatings on the Surface

- of Metals and Alloys // Compos. Interfaces. 2012. Vol. 16, № 4. P. 387–405.
2. Liu Z. et al. Durable and self-healing superhydrophobic polyvinylidene fluoride (PVDF) composite coating with in-situ gas compensation function // Surf. Coatings Technol. 2017. Vol. 327. P. 18–24.
3. Gnedenkov S.V. et al. Composite hydroxyapatite-PTFE coatings on Mg-Mn-Ce alloy for resorbable implant applications via a plasma electrolytic oxidation-based route // J. Taiwan Inst. Chem. Eng. 2014. Vol. 45, № 6. P. 3104–3109.
4. Nadaraia K.V. et al. Protective coatings formed by PEO and fluorine-containing compound // Defect Diffus. Forum. 2018. Vol. 386. P. 343–348.
5. Mashtalyar D.V. et al. Composite coatings formed on Ti by PEO and fluoropolymer treatment // Appl. Surf. Sci. 2021. Vol. 536. P. 147976.
6. Liu S. et al. Micro-arc oxidation preparation of a ZnO-Se composite coating on titanium with anti-oxidation and anti-bacterial potentials for osteomyelitis control // Mater. Lett. 2022. Vol. 327. P. 132978.
7. Zhang R., Zhao J., Liang J. A novel multifunctional PTFE/PEO composite coating prepared by one-step method // Surf. Coatings Technol. 2016. Vol. 299. P. 90–95.
8. Parichehr R., Dehghanian C., Nikbakht A. Preparation of PEO/silane composite coating on AZ31 magnesium alloy and investigation of its properties // J. Alloys Compd. 2021. Vol. 876. P. 159995.
9. Kostelac L. et al. Investigation of hydroxyapatite (HAP) containing coating on grade 2 titanium alloy prepared by plasma electrolytic oxidation (PEO) at low voltage // Surfaces and Interfaces. 2022. Vol. 30. 101888.
10. Ren L. et al. Self-Lubricating PEO–PTFE Composite Coating on Titanium // Self-Lubricating PEO–PTFE Composite Coating on Titanium. Metals 2019. Vol.9. 170.
11. Lu C. et al. Influence of surface microstructure on tribological properties of PEO-PTFE coating formed on aluminum alloy // Surf. Coatings Technol. 2019. Vol. 364. P. 127–134.
12. Martini C. et al. PEO layers obtained from mixed aluminate-phosphate baths on Ti-6Al-4V: Dry sliding behaviour and influence of a PTFE topcoat // Wear. 2010. Vol. 269, № 11–12. P. 747–756.
13. Ebnesajjad S. Fluoroplastics: Volume 2: Melt Processible Fluoropolymers - the Definitive User's Guide and Data Book // Fluoroplastics, Vol. 2 Melt Process. Fluoropolymers - Definitive User's Guide. Data Book, Second Ed. William Andrew Publishing, 2015. P. 1–745.
14. Адаменко Н.А. и др. Фторполимерные материалы / под ред. Бузника В.М. Томск: Изд-во HTЛ, 2017. 600 с.
15. Kim J.S. et al. Influence of hydrophilic polymers on mechanical property and wound recovery of hybrid bilayer wound dressing system for delivering thermally unstable probiotic // Biomater. Adv. 2022. Vol. 135. P. 112696.
16. 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. 2021. Vol. 10, № 4. P. 1033-1050.
17. Mashtalyar D.V. et al. Features of Composite Layers Created Using an Aqueous Suspension of a Fluoropolymer // Polymers. 2022. Vol. 14, № 21. P. 4667.
18. Akbarzadeh S. et al. Self-healing plasma electrolytic oxidation (PEO) coating developed by an assembly of corrosion inhibitive layer and sol-gel sealing on AA2024 // Corros. Sci. 2023. Vol. 222. P. 111424.
19. Akbarzadeh S., Paint Y., Olivier M.G. A comparative study of different sol-gel coatings for sealing the plasma electrolytic oxidation (PEO) layer on AA2024 alloy // Electrochim. Acta. 2023. Vol. 443. P. 141930.
20. Патент 1775419. Способ переработки политетрафторэтилена / Цветников А.К., Уминский А.А. № 4872647; заявл. 10.09.1990; опубл. 15.11.1992.
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. Афонин В.К. et al. Металлы и сплавы: справочник / под ред. Солнцева Ю.П. СПб.: Проффессионал, АНО НПО «Мир и семья», 2023. 1066 с.

23. Owens D.K., Wendt R.C. Estimation of the surface free energy of polymers // J. Appl. Polym. Sci. 1969. Vol. 13, № 8. P. 1741–1747.

Информация об авторах

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

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

И.М. Имишнецкий – 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.

References

1. Gnedenkov S., Sinebryukhov S. Composite Polymer Containing Coatings on the Surface of Metals and Alloys // Compos. Interfaces. Taylor & Francis Group, 2012. Vol. 16, № 4. P. 387–405.
2. Liu Z. et al. Durable and self-healing superhydrophobic polyvinylidene fluoride (PVDF) composite coating with in-situ gas compensation function // Surf. Coatings Technol. Elsevier, 2017. Vol. 327. P. 18–24.
3. Gnedenkov S.V. et al. Composite hydroxyapatite-PTFE coatings on Mg-Mn-Ce alloy for resorbable implant applications via a plasma electrolytic oxidation-based route // J. Taiwan Inst. Chem. Eng. 2014. Vol. 45, № 6. P. 3104–3109.
4. Nadaraia K.V. et al. Protective coatings formed by PEO and fluorine-containing compound // Defect Diffus. Forum. 2018. Vol. 386. P. 343–348.
5. Mashtalyar D.V. et al. Composite coatings formed on Ti by PEO and fluoropolymer treatment // Appl. Surf. Sci. 2021. Vol. 536. P. 147976.
6. Liu S. et al. Micro-arc oxidation preparation of a ZnO-Se composite coating on titanium with anti-oxidation and anti-bacterial potentials for osteomyelitis control // Mater. Lett. North-Holland, 2022. Vol. 327. P. 132978.
7. Zhang R., Zhao J., Liang J. A novel multi-functional PTFE/PEO composite coating prepared by one-step method // Surf. Coatings Technol. Elsevier, 2016. Vol. 299. P. 90–95.
8. Parichehr R., Dehghanian C., Nikbakht A. Preparation of PEO/silane composite coating on AZ31 magnesium alloy and investigation of its properties // J. Alloys Compd. Elsevier, 2021. Vol. 876. P. 159995.
9. Kostelac L. et al. Investigation of hydroxyapatite (HAP) containing coating on grade 2 titanium alloy prepared by plasma electrolytic oxidation (PEO) at low voltage // Surfaces and Interfaces. 2022. Vol. 30, № March.
10. Ren L. et al. Self-Lubricating PEO-PTFE Composite Coating on Titanium // Met. 2019, Vol. 9, Page 170. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2019. Vol. 9, № 2. P. 170.
11. Lu C. et al. Influence of surface microstructure on tribological properties of PEO-PTFE coating formed on aluminum alloy // Surf. Coatings Technol. Elsevier, 2019. Vol. 364. P. 127–134.
12. Martini C. et al. PEO layers obtained from mixed aluminate-phosphate baths on Ti-6Al-4V: Dry sliding behaviour and influence of a PTFE topcoat // Wear. 2010. Vol. 269, № 11–12. P. 747–756.
13. Ebnesajjad S. Fluoroplastics: Volume 2: Melt Processible Fluoropolymers - the Definitive User's Guide and Data Book // Fluoroplastics, Vol. 2 Melt Process. Fluoropolymers - Defin. User's Guid. Data Book, Second Ed. William Andrew Publishing, 2015. P. 1–745.
14. Adamenko N.A. et al. Ftorpolimernyematerialy [Fluoropolymer materials]. Ed. by Buznik V.M. Tomsk: Izd-vo NTL, 2017. 600 p. (In Russ.)
15. Kim J.S. et al. Influence of hydrophilic polymers on mechanical property and wound recovery of hybrid bilayer wound dressing system for delivering thermally unstable probiotic // Biomater. Adv. Elsevier, 2022. Vol. 135. P. 112696.
16. 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.
17. Mashtalyar D.V. et al. Features of Composite Layers Created Using an Aqueous Suspension

of a Fluoropolymer // *Polymers* (Basel). 2022. Vol. 14, № 21. P. 4667.

18. Akbarzadeh S. et al. Self-healing plasma electrolytic oxidation (PEO) coating developed by an assembly of corrosion inhibitive layer and sol-gel sealing on AA2024 // *Corros. Sci.* Pergamon, 2023. Vol. 222. P. 111424.

19. Akbarzadeh S., Paint Y., Olivier M.G. A comparative study of different sol-gel coatings for sealing the plasma electrolytic oxidation (PEO) layer on AA2024 alloy // *Electrochim. Acta.* Elsevier Ltd, 2023. Vol. 443, № November 2022. P. 141930.

20. Tsvetnikov, A.K., & Uminsky, A.A. (1992). Method for processing polytetrafluoroethylene (Patent No. 1775419 Russia). (In Russ.)

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

22. Afonin V.K. et al. Metals and alloys: handbook [Metallyisplavy: spravochnik]. Ed. by Solntsev Yu.P. Saint Petersburg, Professional, ANO NPO "Mir isemya" Publ., 2023. 1066 p. (In Russ.)

23. Owens D.K., Wendt R.C. Estimation of the surface free energy of polymers // *J. Appl. Polym. Sci.* Wiley Online Library, 1969. Vol. 13, № 8. P. 1741–1747

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 28.05.2026; одобрена после рецензирования 07.09.2026; принята к публикации 14.09.2026.

The article was received by the editorial board on 28 May 2026; approved after reviewing 07 Sep. 2026; accepted for publication 14 Sep. 2026.