

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-3-230-240>

УДК 539.25

Оригинальная статья

Ая Алнур Хади¹, Е. В. Торская^{1,2*}, В. Н. Малышев³, П. О. Буковский²,
Т. И. Муравьева², О. О. Щербакова²

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
Ярославское шоссе, 26, 129337, Москва, Российская Федерация

²Институт проблем механики имени А. Ю. Ишлинского Российской академии наук,
пр. Вернадского, 101, корп. 1, 119526, Москва, Российская Федерация

³Российский государственный университет нефти и газа
(национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина,
Ленинский пр., 65, 119991, Москва, Российская Федерация

**ВЛИЯНИЕ АНТИФРИКЦИОННОГО ПОЛИМЕРНОГО
МОДИФИКАТОРА НА ТРЕНИЕ И ИЗНОС МДО-ПОКРЫТИЙ
НА АЛЮМИНИЕВОМ СПЛАВЕ Д16**

Аннотация. Микродуговое окислирование позволяет получить на поверхности алюминиевых сплавов защитные покрытия, в том числе триботехнического назначения. Недостатком является относительно высокий коэффициент трения, а также и малая устойчивость к сдвиговой деформации. Улучшение свойств покрытий возможно при их модификации путем введения в электролит различных добавок с целью увеличения износостойкости покрытий и уменьшения коэффициента трения скольжения в паре с различными материалами. Были исследованы МДО-покрытия, созданные на основе коммерческого сплава Д16. В базовый электролит добавлялся полимерный модификатор (мелкодисперсный фторопласт) в сочетании со синтанолом от 0,5 до 6 г/л (все пять вариантов покрытия). Испытания на трение в соответствии со стандартом ASTM G99 проводились на триботестере MFT-5000 (Rtec, США) в режиме однонаправленного скольжения шарика (диаметр 10 мм) из карбида кремния по поверхности образцов. На оптическом профилометре S neox 3D (Sensofar-Tech, Испания) были получены оптические изображения дорожек трения и пятен контакта контр-тела. Установлено, что линейный износ контр-тела составляет не более 10 мкм. Значения коэффициента трения (от 0,4 до 0,6) в среднем меньше, чем для контакта керамика-керамика, что связано с наличием антифрикционного модификатора. Присутствие модификатора в электролите способствует увеличению пористости керамического покрытия. При этом покрытие является износостойким (износ на уровне шероховатости) при малых концентрациях модификатора. Таким образом, существует оптимальное для данных условий фрикционного контакта количество модификатора, обеспечивающее снижение трения, но не увеличивающее критически пористость покрытия.

Ключевые слова: керамические покрытия, мелкодисперсный фторопласт, трение, износ, сканирующая электронная микроскопия

Благодарности: работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Министерства науки и образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Хади Ая Алнур – аспирант Национального исследовательского Московского государственного строительного университета. E-mail: ayaalnourhadi775@gmail.com; Торская Елена Владимировна – доктор физико-математических наук, профессор Российской академии наук, ведущий научный сотрудник Института проблем механики имени А. Ю. Ишлинского Российской академии наук, профессор Национального исследовательского Московского государственного строительного университета. <https://orcid.org/0000-0001-5654-7441>. E-mail: torskaya@mail.ru; Малышев Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор Российского государственного университета нефти и газа (национального исследовательского университета) имени И. М. Губкина. E-mail: vmal@inbox.ru; Буковский Павел Олегович – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института проблем механики имени А. Ю. Ишлинского Российской академии наук. E-mail: bukovskiyro@ipmnet.ru; Муравьева Тамара Ивановна – научный сотрудник Института проблем механики имени А. Ю. Ишлинского Российской академии наук. E-mail: muravyeva@list.ru; Щербакова Ольга Олеговна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института проблем механики имени А. Ю. Ишлинского Российской академии наук. E-mail: shcherbakovaoo@mail.ru

Вклад авторов: Хади Ая Алнур – проведение экспериментов, написание текста рукописи; Торская Елена Владимировна – основная идея исследования, анализ экспериментальных данных, редактирование рукописи, фор-

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

мулировка выводов; *Малышев Владимир Николаевич* – разработка методологии получения и создание материалов для исследования; *Буковский Павел Олегович* – отработка методики экспериментального исследования; *Муравьева Тамара Ивановна* – исследования методами микроскопии; *Щербакова Ольга Олеговна* – анализ результатов, полученных методами микроскопии.

Для цитирования: Влияние антифрикционного полимерного модификатора на трение и износ МДО-покрытий на алюминиевом сплаве Д16 / А. А. Хади, Е. В. Торская, В. Н. Малышев [и др.] // Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2025. – Т. 70, № 3. – С. 230–240. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-3-230-240>

Поступила в редакцию: 21.07.2025

Утверждена к публикации: 09.09.2025

Подписана в печать: 18.09.2025

Original article

Aya Alnour Hadi¹, Elena V. Torskaya^{1,2*}, Vladimir N. Malyshev³, Pavel O. Bukovsky²,
Tamara I. Muravyeva², Olga O. Shcherbakova²

¹Moscow State University of Civil Engineering (National Research University),
26, Yaroslavskoe shosse, 129337, Moscow, Russian Federation

²Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences,
101, blvd. 1, Vernadskogo Ave., 119526, Moscow, Russian Federation

³National University of Oil and Gas “Gubkin University”,
65, Leninsky Ave., 119991, Moscow, Russian Federation

EFFECT OF ANTIFRICTION POLYMER MODIFIER ON FRICTION AND WEAR OF MAO COATINGS ON Al–Cu–Mg ALUMINUM ALLOY

Abstract. Microarc oxidation allows to obtain protective coatings on the surface of aluminum alloys, including those for tribotechnical purposes. The disadvantage is a relatively high friction coefficient, as well as low resistance to shear deformation. Improving the properties of the coatings is possible through their modification by adding various additives to the electrolyte in order to increase the wear resistance of the coatings and reduce sliding friction with various materials. MAO coatings created on a commercial Al–Cu–Mg aluminium alloy were studied; a polymer modifier (finely dispersed fluoroplastic) was added to the base electrolyte in combination with Sintanol from 0.5 to 6 g/l, a total of five coatings. Friction tests were performed on tribotester MFT-5000 (Rtec, USA) in the mode of unidirectional sliding of a silicon carbide ball (diameter 10 mm) on the surface of samples in accordance with the ASTM G99 standard. Optical images of friction tracks and contact spots of the counter-body were obtained on the optical profilometer S neox 3D (Sensofar-Tech, Spain). It was found that the linear wear of the counter-body is no more than 10 µm. The values of the friction coefficient (from 0.4 to 0.6) are on average less than for the ceramic-to-ceramic contact, which is due to the presence of an antifriction modifier. The presence of a modifier in the electrolyte contributes to an increase in the porosity of the ceramic coating. The coating is wear-resistant (wear at the level of roughness) at low concentrations of the modifier. Thus, there is an optimal amount of modifier for these frictional contact conditions, which ensures a decrease in friction, but does not critically increase the porosity of the coating.

Keywords: ceramic coatings, finely dispersed fluoroplastic, friction, wear, scanning electron microscopy

Acknowledgements: the work was carried out within the framework of a large scientific project with financial support from the Ministry of Education and Science of Russia (agreement No. 075-15-2024-535 dated 23.04.2024).

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

Information about the authors: *Aya Alnour Hadi* – Postgraduate Student at Moscow State University of Civil Engineering (National Research University). E-mail: ayaalnourhadi775@gmail.com; *Elena V. Torskaya* – Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Professor of the Russian Academy of Sciences, Leading Researcher at Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Professor at Moscow State University of Civil Engineering (National Research University). <https://orcid.org/0000-0001-5654-7441>. E-mail: torskaya@mail.ru; *Vladimir N. Malyshev* – Dr. Sci. (Engineering), Professor at National University of Oil and Gas “Gubkin University”. E-mail: vmal@inbox.ru; *Pavel O. Bukovsky* – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Researcher at Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences. E-mail: bukovskiy@ipmnet.ru; *Tamara I. Muravyeva* – Researcher at Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences. E-mail: muravyeva@list.ru; *Olga O. Shcherbakova* – Cand. Sci. (Engineering), Researcher at Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences. E-mail: shcherbakovaoo@mail.ru

Contribution of the authors: *Aya Alnour Hadi* – conducting experiments, writing the manuscript; *Elena V. Torskaya* – main idea of the study, analysis of experimental data, editing the manuscript, formulating conclusions; *Vladimir N. Malyshev* – development of the methodology for obtaining and creating materials for the study; *Pavel O. Bukovsky* – development of the experimental study methodology; *Tamara I. Muravyeva* – research using microscopy methods; *Olga O. Shcherbakova* – analysis of the results obtained using microscopy methods.

For citation: Hadi A. A., Torskaya E. V., Malyshev V. N., Bukovsky P. O., Muravyeva T. I., Shcherbakova O. O. Effect of antifriction polymer modifier on friction and wear of MAO coatings on Al–Cu–Mg aluminum alloy. *Vesti Natsyonal'noi akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-tekhnichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2025, vol. 70, no. 3, pp. 230–240 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-3-230-240>

Received: 21.07.2025

Approved for publication: 09.09.2025

Signed to the press: 18.09.2025

Введение. Алюминий и его сплавы широко используются во многих технологических областях, таких как транспорт (автомобильные и авиационные детали), аэрокосмическая промышленность, строительство, оборонная техника, здравоохранение и др. Это обусловлено его распространенностью, низкой стоимостью, пригодностью ко вторичной переработке, стабильными механическими свойствами при температурах, подходящих для авиационных и космических условий, и высокой прочностью относительно его плотности [1–3]. Однако, несмотря на эти преимущества, низкая твердость алюминия и его сплавов делает их восприимчивыми к коррозии и износу. Поэтому их поверхности необходимо защищать для улучшения механических свойств данных материалов [1].

Целью разработчиков модифицированных покрытий во многих случаях является увеличение износостойкости покрытий и уменьшение коэффициента трения скольжения в паре с различными материалами. Микродуговое оксидирование на поверхностях алюминиевых сплавов обеспечивает хорошую защиту от коррозии, износостойкость и устойчивость к различным видам излучения, однако эти покрытия имеют относительно высокий коэффициент трения и низкое сопротивление сдвиговой деформации [4–7]. Улучшение свойств покрытий возможно при их модификации путем введения в электролит различных добавок либо путем финишной обработки, когда модификаторами насыщается поверхностный, наиболее пористый слой керамики [8–11]. Добавление антифрикционного модификатора непосредственно в электролит позволяет получать МДО-покрытия с улучшенными прочностными свойствами (в том числе износостойкостью) за счет заполнения пор модификатором, в том числе антифрикционными полимерами [12, 13]. Так, использование политетрафторэтилена для заполнения микропор на поверхности покрытия позволяет достичь снижения коэффициента трения, тем самым уменьшая износ и продлевая срок службы покрытия [14, 15].

Цель работы – изучение влияния количества мелкодисперсного полимерного модификатора на трение и износ МДО-покрытий, сформированных на алюминиевом сплаве Д16.

Материалы и методы исследований. При проведении исследования использовали образцы в виде дисков из деформируемого алюминиевого сплава Д16, химический состав которого приведен в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Химический состав сплава Д16
T a b l e 1. Chemical composition of the alloy Al-Cu-Mg aluminium alloy

Химический элемент, мас.% Chemical element, wt.%										Плотность, г/см ³ Density, g/cm ³
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ni	Al	
0,5	0,5	3,8–4,9	0,3–0,9	1,2–1,8	0,1	0,25	0,15	—	основа / base	2,77

Размеры используемых образцов были следующими: диаметр – 50 мм с лыской длиной 3 мм, толщина – 7 мм. Перед проведением процесса формирования МДО-покрытия диски очищались от загрязнений и притирались на чугунной плите с порошком оксида алюминия зернистостью менее 100 мкм до получения необходимой плоскостности поверхности. После чего они промывались последовательно в проточной воде с моющими средствами, в ацетоне, этиловом спирте и в дистиллированной воде, а затем высушивались на воздухе. Были подготовлены пять серий образцов для формирования покрытий методом МДО в электролите с содержанием различного количества фторопластового порошка «Форум» производства компании «Владфорум» (Россия).

Базовый электролит готовился путем последовательного разведения в дистиллированной воде необходимого количества едкого калия (КОН) и жидкого стекла ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$, ЖСТ) из расчета 2 г/л КОН и 9 г/л ЖСТ. Далее в базовый электролит вводилась суспензия, подготовленная путем смешивания расчетного количества фторопластового порошка «Форум» в изопропиловом спирте с добавлением поверхностно-активного вещества синтанол марки ДС-10

(ТУ 2483-016-71150986-12). Режимы формирования и характеристики подготовленных образцов с МДО-покрытием, включая шероховатость поверхности, приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Режимы формирования МДО-покрытий, толщина и шероховатость
 Table 2. Modes of MAO coating formation, thickness and roughness

Серия эксперимента Experiment series	Состав электролита Composition of the electrolyte	Время, мин Time, min	Толщина покрытия до механической обработки мкм Coating thickness before machining, μm	Толщина покрытия после притирки, мкм Coating thickness after lapping, μm	Ra, мкм Ra, μm	Rz, мкм Rz, μm
1	БЭ + 0,5 г/л С	60	130–140	90–100	$0,7 \pm 0,05$	$6,4 \pm 0,4$
2	БЭ + 1,0 г/л С	60	130–140	90–100	$1,1 \pm 0,05$	$11,2 \pm 0,9$
3	БЭ + 2,0 г/л С	60	130	100	$0,8 \pm 0,07$	$6,2 \pm 0,4$
4	БЭ + 3 г/л С	60	130	100	$0,9 \pm 0,12$	$6,7 \pm 0,7$
5	БЭ + 6 г/л С	60	120–130	90–100	$3,6 \pm 1,25$	$30,9 \pm 12,9$

П р и м е ч а н и е: БЭ – базовый электролит, С – суспензия.

N o t e: БЭ – basic electrolyte, С – suspension.

Эксперимент на трение и износ проводился на трибометре MFT-5000 (Rtec Instruments Inc., США) по стандартной методике в соответствии с ASTM G99-23¹ по схеме шар – диск. В ходе теста было реализовано однонаправленное сухое скольжение шарика из карбида кремния (диаметр 10 мм) по поверхности образцов (рис. 1) при постоянной нагрузке $F = 10$ Н и линейной скорости $V = 0,1$ м/с. Путь трения составил 1000 м, а время испытания – 10 000 с. Для обеспечения повторности и увеличения полезной площади образцов кроме стандартного радиуса дорожки трения, который равен 16 мм, были также проведены тесты с радиусом трека 12 мм для каждого образца. При этом варьировался параметр угловой скорости для сохранения постоянной линейной скорости.

На оптическом профилометре S neox 3D (Sensofar, Испания) были получены оптические изображения дорожек трения (объектив 20 $\times$) и пятен контакта контр-тела. Сканирование проводилось в конфокальном режиме с автоматизированной сшивкой отдельных кадров в одну область. По полученным изображениям на образцах измерялся изношенный объем всей фрикционной

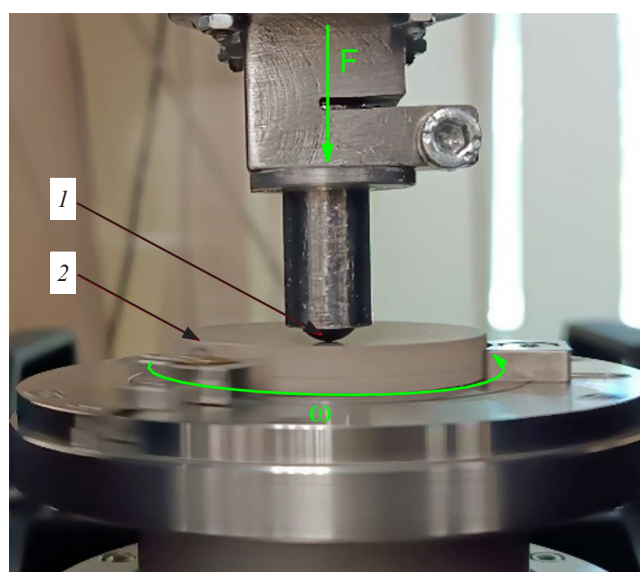


Рис. 1. Схема испытания: 1 – керамический шарик, 2 – образец с МДО-покрытием

Fig. 1. Test scheme: 1 – ceramic ball, 2 – sample with MAO coating

¹ ASTM G99-23. Standard Test Method for Wear and Friction Testing with a Pin-on-Disk or Ball-on-Disk Apparatus. URL: https://img.antpedia.com/standard/files/pdfs_or/20231128/ASTM/G%2099%20-%202023.pdf (date of access: 20.05.2025).

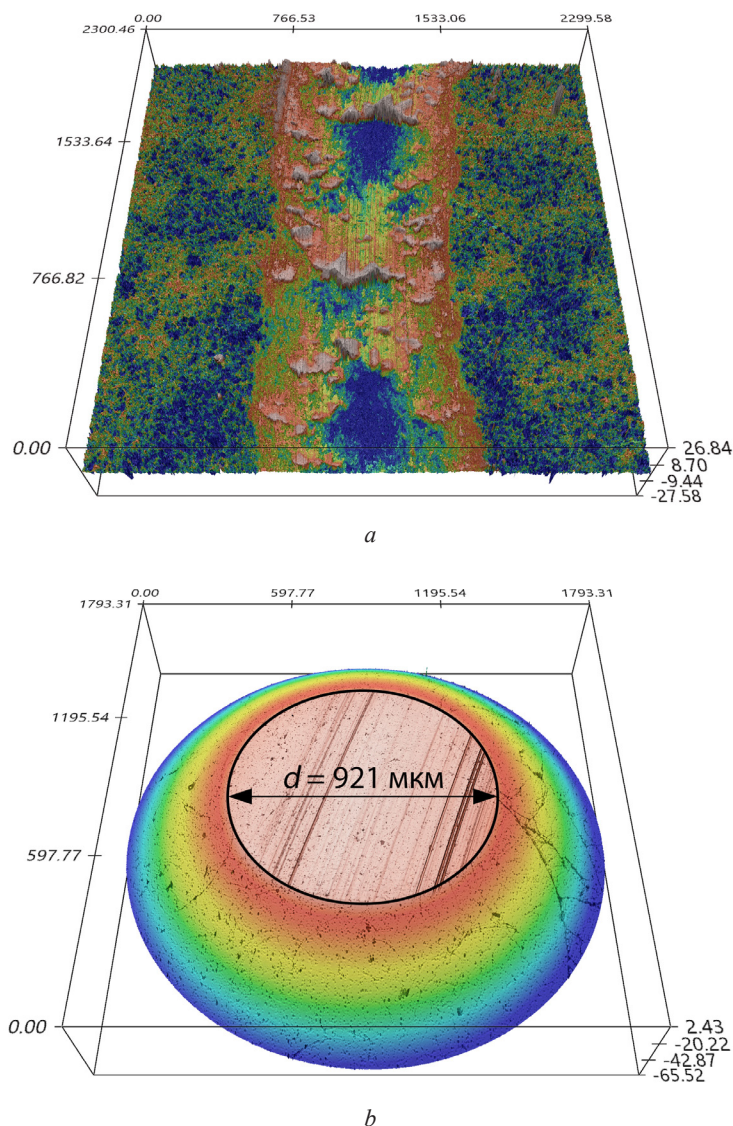


Рис. 2. Профилотграммы образца 2 и контр-тела после испытания: *a* – дорожка трения на покрытии, *b* – шарик
Fig. 2. Profilograms of sample 2 and the counter-body after testing: *a* – friction track on the coating, *b* – ball

канавки. На рис. 2 в качестве примера приведены профилотграммы износа дорожки трения (*a*) и шарика (*b*) для образца 2.

Структура образцов исследовалась на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Quanta 650 (FEI, США), оснащенном аналитическим оборудованием EDAX, в том числе энергодисперсионным рентгеноспектральным микроанализатором (EDS), при ускоряющем напряжении 20 кВ. Поскольку изучаемые керамические МДО-покрытия являются диэлектриками, то при работе был выбран специальный низковакуумный режим исследования. В этом режиме в качестве рабочей среды использовался разреженный водяной пар при остаточном давлении 15–20 Па. Поверхность образцов с МДО-покрытиями изучали как в исходном состоянии, так и после трибологических испытаний.

Результаты и их обсуждение. Для всех образцов были получены зависимости коэффициента трения от времени испытания (рис. 3). Значения коэффициента трения в среднем ниже, чем для контакта керамика-керамика, и находятся в диапазоне от 0,1 до 0,65. Образец 5 (с наибольшим количеством модификатора в электролите) и, отчасти, образцы 1 и 3 имели периоды неустойчивости коэффициента трения. Образец 4 продемонстрировал самый низкий и стабильный коэффициент трения ($\text{COF} = 0,46$).

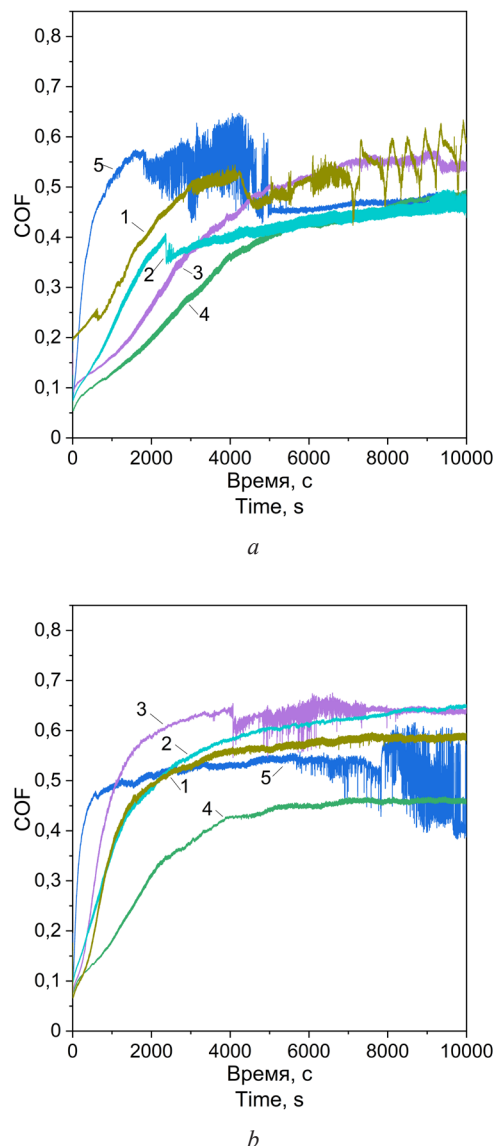


Рис. 3. Зависимости коэффициента трения от времени испытания для всех исследуемых образцов (цифры 1–5 соответствуют номерам образцов); *a* – радиус дорожки 16 мм, *b* – радиус дорожки 12 мм
 Fig. 3. Dependences of friction coefficient on the test time for all samples (numbers 1–5 correspond to sample numbers); *a* – track radius 16 mm, *b* – track radius 12 mm

Результаты по трению и износу образцов и шариков сведены в табл. 3. Следует отметить, что износ контр-тела растет с увеличением количества модификатора в электролите. Минимальный износ покрытия зафиксирован для образца 4, который также показал лучший коэффициент трения. Полученные результаты можно объяснить, используя результаты, полученные методами микроскопии.

Таблица 3. Результаты испытаний на трение и износ
 Table 3. Results of friction and wear tests

Серия эксперимента Experiment series	Износ дорожки трения, мм ³ Friction track wear, mm ³	Износ шарика, мм ³ Ball wear, mm ³	Коэффициент трения (μ) Coefficient of friction (μ)
1	0,902 ± 0,278	0,00 439 ± 0,0006	0,55 ± 0,024
2	0,548 ± 0,0388	0,00 558 ± 0,0002	0,53 ± 0,073
3	1,093 ± 0,106	0,00 655 ± 0,0009	0,60 ± 0,032
4	0,441 ± 0,037	0,00 739 ± 0	0,46 ± 0
5	1,089 ± 0,149	0,0625 ± 0,0418	0,50 ± 0,024

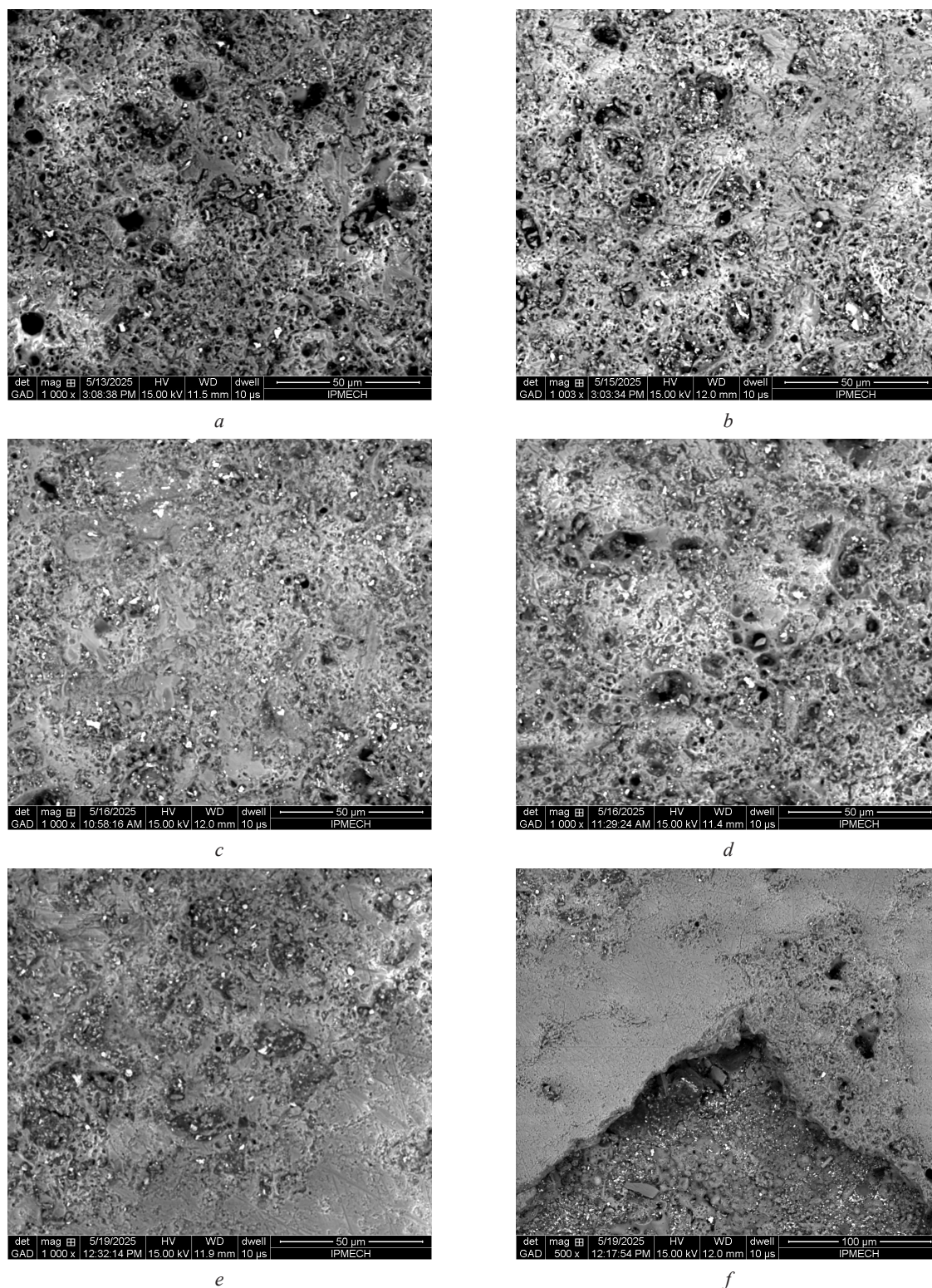


Рис. 4. СЭМ-изображения поверхностей образцов 1–5 (*a–e* соответственно), $1000\times$, и поверхности образца 5 (*f*), $500\times$

Fig. 4. SEM images of the surfaces of samples 1–5 (*a–e*, respectively) at $1000\times$, and the surface of sample 5 (*f*) at $500\times$

На рис. 4 показано, насколько различается поверхность образцов в зависимости от количества модификатора в электролите. Для всех образцов использовано увеличение $1000\times$ (*a–e*). Образец 5 имел поверхностные дефекты, наилучшим образом отображаемые при $500\times$ (*f*). Поры, характерные для керамических покрытий, имеют разные формы и размеры.

В табл. 4 представлены результаты EDS-анализа исходных покрытий. Наличие в составе антифрикционного полимера можно идентифицировать по содержанию фтора, который присутствует во всех образцах. Причем нет четкой корреляции между количеством модификатора в электролите и фтора в поверхностных слоях образца (больше всего фтора в образцах с наименьшим и наибольшим содержанием модификатора в электролите).

Т а б л и ц а 4. Содержание химических элементов в исходных покрытиях

Table 4. Content of chemical elements in the initial coatings

Серия эксперимента Experiment series	Химический элемент, мас.% Chemical element, wt.%										
	C	O	F	Na	Mg	Al	Si	P	K	Fe	Cu
1	16,86	40,15	1,31	1,92	0,92	22,61	11,10	1,07	2,71	0,68	0,68
2	17,49	37,41	0,73	1,27	0,89	26,66	9,59	1,03	2,26	1,49	1,17
3	17,74	37,11	0,46	2,01	0,50	20,01	13,19	0,58	3,58	2,79	1,85
4	25,11	35,66	1,12	2,03	0,84	20,29	8,99	0,82	2,34	1,57	1,24
5	19,84	38,59	1,30	1,06	0,57	21,43	12,41	0,97	2,06	1,18	0,59

На рис. 5 показаны существенные различия в рельефе дорожек образцов 1 и 5, выбранных для анализа из-за содержания минимального и максимального количества модификатора в элек-

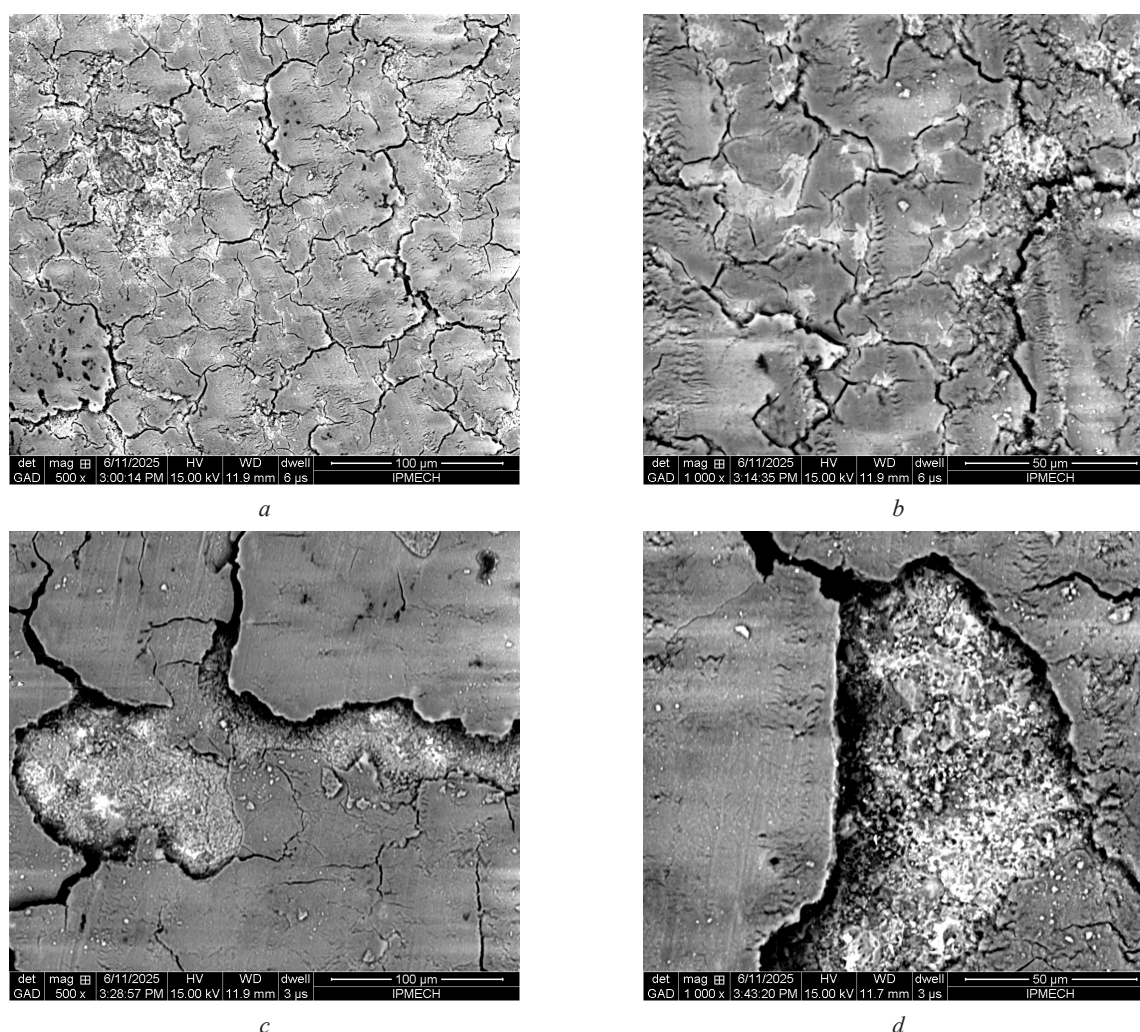


Рис. 5. СЭМ-изображения поверхностей дорожек трения образцов 1 (*a, b*) и 5 (*c, d*);
a, c – 500[×] и *b, d* – 1000[×]

Fig. 5. SEM images of surfaces of friction tracks of samples 1 (*a, b*) and 5 (*c, d*);
a, c – 500[×] and *b, d* – 1000[×]

тролите и примерно одинакового количества фтора в поверхностных слоях до трения. На СЭМ-изображениях наблюдаются характерные признаки разрушения (локальные трещины). При этом отмечается общее сглаживание поверхности по сравнению с исходным состоянием, что может быть обусловлено абразивным износом и/или деформацией в процессе трения. Для образца 5 характерно образование крупных локальных трещин, приводящее к отслаиванию верхних слоев покрытия. Очевидно, это связано с изначальной дефектностью поверхности. Следует отметить, что химический анализ областей 1 и 2, изначально находившихся под поверхностью и открытых в результате разрушения, показал наличие фтора (табл. 5).

Т а б л и ц а 5. Содержание элементов на поверхности дорожки трения

T a b l e 5. Content of elements on the friction track

Образец, увеличение Sample, magnification	Исследованный участок Investigated area	Химический элемент, мас.% Chemical element, wt.%										
		C	O	F	Na	Mg	Al	Si	P	K	Fe	Cu
1, 1000 [×]	1	4,22	45,63	0,97	0,98	0,86	28,78	13,19	1,58	2,24	0,49	1,06
	2	1,08	41,69	0,93	0,41	1,14	42,18	9,19	2,04	0,83	0,22	0,29
	3	4,73	48,55	1,05	0,75	0,74	25,01	14,33	1,29	2,22	0,39	0,94
	4	2,36	41,57	0,66	0,83	0,88	35,19	11,99	1,68	2,58	0,64	1,62
	Весь / All	6,24	47,11	1,48	1,13	0,81	25,63	13,29	1,48	2,15	0,23	0,45
5, 1000 [×]	1	1,02	40,87	0,77	1,30	0,67	28,50	16,66	1,62	3,66	0,92	4,01
	2	0,93	42,68	0,17	0,46	0,40	34,70	11,58	1,02	4,02	0,90	3,14
	3	2,63	48,78	1,55	0,79	0,77	30,12	11,09	1,60	1,37	0,39	0,91
	Весь / All	3,10	47,31	1,25	0,73	0,66	31,63	10,84	1,41	1,77	0,26	1,04

Заклучение. Таким образом, введение модификатора в электролит при формировании МДО-покрытий приводит к появлению в покрытиях антифрикционной добавки и снижению коэффициента трения. При этом количество полимера не находится в четкой корреляции с количеством модификатора в электролите. Наибольшее из рассмотренных количество модификатора приводит к дефектности поверхностного слоя и его разрушению при трении. Зависимость объемного износа от концентрации добавок имеет нелинейный характер: наблюдается его уменьшение при увеличении концентрации до 3 г/л. Следовательно, для данных условий фрикционного контакта существует оптимальная концентрация модификатора, обеспечивающая снижение трения, при этом не приводящая к критическому увеличению пористости покрытия и, как следствие, к повышенному износу. Важным результатом является также наличие антифрикционной добавки в подповерхностных слоях покрытия, что обуславливает стабильное значение коэффициента трения в процессе изнашивания.

Список использованных источников

1. Structure, friction and wear of AlZn5.5MgCu based PEO coatings modified by diamond nanoparticles and silver micropowder / E. Torskaya, I. Shkalei, A. Morozov [et al.] // Tribology International. – 2025. – Vol. 203. – P. 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.110417>
2. Incremental fatigue damage modeling of 7050-T7 aluminum alloy at stress-raisers / S. Lindström, J. Moverare, D. Leidermark [et al.] // International Journal of Fatigue. – 2022. – Vol. 161, iss. 1–2. – Art. ID 106878. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106878>
3. Growth mechanism and performance of MAO-AO composite coating obtained by two-stage process / Z. Fan, H. Lu, p. Liu [et al.] // Ceramics International. – 2024. – Vol. 50, iss. 22, part A. – P. 44993–45005. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.08.337>
4. Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) Process–Processing, Properties, and Applications / S. Sikdar, P. V. Menezes, R. Maccione [et al.] // Nanomaterials. – 2021. – Vol. 11, № 6. – Art. ID 1375. <https://doi.org/10.3390/nano11061375>
5. Micro-Arcs Oxidation Layer Formation on Aluminium and Coatings Tribological Properties – A Review / L. Rodriguez, J.-Y. Paris, J. Denape, K. Delbé // Coatings. – 2023. – Vol. 13, № 2. – Art. ID 373. <https://doi.org/10.3390/coatings13020373>
6. The Characterization of Coatings Formed on As-Cast Al, Al–Si, and Al–Ca Aluminum Substrates by Plasma Electrolytic Oxidation / N. V. Letyagin, T. K. Akopyan, A. A. Sokorev [et al.] // Metals. – 2023. – Vol. 13, № 9. – Art. ID 1509. <https://doi.org/10.3390/met13091509>

7. Surface characteristics underpinning fretting wear performance of heavily loaded duplex chameleon/PEO coatings on Al / M. Lin, A. Nemcova, A. A. Voevodin [et al.] // *Tribology International*. – 2021. – Vol. 154. – Art. ID 106723. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106723>
8. Processing and Tribological Properties of PEO Coatings on AlZn5.5MgCu Aluminium Alloy with Incorporated Al–Cu–Fe Quasicrystals / E. V. Torskaya, A. V. Morozov, V. N. Malyshev, O. O. Shcherbakova // *Ceramics*. – 2023. – Vol. 6, № 2. – P. 858–871. <https://doi.org/10.3390/ceramics6020049>
9. Plasma electrolytic oxidation of aluminium in electrolytes containing various concentrations of carbon black nanoparticles / L. Magniez, C. Da Silva Tusch, S. Fontana [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. – 2023. – Vol. 473. – Art. ID 129990. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129990>
10. Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) as pre-treatment for sol-gel coating on aluminum and magnesium alloys / L. Pezzato, M. Rigon, A. Martucci [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. – 2019. – Vol. 366. – P. 114–123. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.03.023>
11. PEO-Chameleon as a potential protective coating on cast aluminum alloys for high-temperature applications / A. Shirani, T. Joy, A. Rogov [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. – 2020. – Vol. 397. – Art. ID 126016. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126016>
12. Self-Lubricating PEO–PTFE Composite Coating on Titanium / L. Ren, T. Wang, Z. Chen [et al.] // *Metals*. – 2019. – Vol. 9, № 2. – P. 170. <https://doi.org/10.3390/met9020170>
13. Influence of ceramic coating pores on the Tribological performance of PEO–PTFE composite coatings on the Ta–12W alloy / L. Liu, L. Wang, J. Pan [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. – 2022. – Vol. 441. – Art. ID 128592. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128592>
14. Effect of current density and polytetrafluoroethylene on the properties of micro-arc oxide coating of pure aluminum International / J. Chen, W. Li, J. Xu [et al.] // *Journal of Applied Ceramic Technology*. – 2023. – Vol. 20, № 5. – P. 2860–2873. <https://doi.org/10.1111/ijac.14412>
15. Influence of surface microstructure on tribological properties of PEO-PTFE coating formed on aluminum alloy / C. Lu, X. Feng, J. Yang [et al.] // *Surface and Coatings Technology*. – 2019. – Vol. 364. – P. 127–134. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.02.064>

References

1. Torskaya E., Shkalei I., Morozov A., Stepanov F., Malyshev V., Svistkov A. Structure, friction and wear of AlZn5.5MgCu based PEO coatings modified by diamond nanoparticles and silver micropowder. *Tribology International*, 2025, vol. 203, pp. 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.110417>
2. Lindström S., Moverare J., Leidermark D., Ansell H., Kapidžić Z. Incremental fatigue damage modeling of 7050-T7 aluminum alloy at stress-raisers. *International Journal of Fatigue*, 2022, vol. 161, iss. 1–2, art. ID. 106878. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106878>
3. Fan Z., Lu H., Liu p., Pan H., Ding Y., Xu G., Tu N. Growth mechanism and performance of MAO-AO composite coating obtained by two-stage process. *Ceramics International*, 2024, vol. 50, iss. 22, part A, pp. 44993–45005. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.08.337>
4. Sikdar S., Menezes P. V., Maccione R., Jacob T., Menezes P. L. Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) Process—Processing, Properties, and Applications. *Nanomaterials*, 2021, vol. 11, no. 6, art. ID 1375. <https://doi.org/10.3390/nano11061375>
5. Rodriguez L., Paris J.-Y., Denape J., Delbé K. Micro-Arcs Oxidation Layer Formation on Aluminium and Coatings Tribological Properties – A Review. *Coatings*, 2023, vol. 13, no. 2, art. ID 373. <https://doi.org/10.3390/coatings13020373>
6. Letyagin N. V., Akopyan T. K., Sokorev A. A., Sviridova T. A., Cherkasov S. O., Mansurov Y. N. The Characterization of Coatings Formed on As–Cast Al, Al–Si, and Al–Ca Aluminum Substrates by Plasma Electrolytic Oxidation. *Metals*, 2023, vol. 13, no. 9, art. ID 1509. <https://doi.org/10.3390/met13091509>
7. Lin M., Nemcova A., Voevodin A. A., Korenyi-Both A., Liskiewicz T. W., Laugel N., Yerokhin A. Surface characteristics underpinning fretting wear performance of heavily loaded duplex chameleon/PEO coatings on Al. *Tribology International*, 2021, vol. 154, art. ID 106723. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106723>
8. Torskaya E. V., Morozov A. V., Malyshev V. N., Shcherbakova O. O. Processing and Tribological Properties of PEO Coatings on AlZn5.5MgCu Aluminium Alloy with Incorporated Al–Cu–Fe Quasicrystals. *Ceramics*, 2023, vol. 6, no. 2, pp. 858–871. <https://doi.org/10.3390/ceramics6020049>
9. Magniez L., Da Silva Tusch C., Fontana S., Cahen S., Martin J., Hérold C., Henrion G. Plasma electrolytic oxidation of aluminium in electrolytes containing various concentrations of carbon black nanoparticles. *Surface and Coatings Technology*, 2023, vol. 473, art. ID 129990. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129990>
10. Pezzato L., Rigon M., Martucci A., Brunelli K., Dabalà M. Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) as pre-treatment for sol-gel coating on aluminum and magnesium alloys. *Surface and Coatings Technology*, 2019, vol. 366, pp. 114–123. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.03.023>
11. Shirani A., Joy T., Rogov A., Lin M., Yerokhin A., Mogonye J.-E., Berman D. PEO-Chameleon as a potential protective coating on cast aluminum alloys for high-temperature applications. *Surface and Coatings Technology*, 2020, vol. 397, art. ID 126016. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126016>
12. Ren L., Wang T., Chen Z., Li Y., Qian L. Self-Lubricating PEO–PTFE Composite Coating on Titanium. *Metals*, 2019, vol. 9, no. 2, art. ID 170. <https://doi.org/10.3390/met9020170>

13. Liu L., Wang L., Pan J., Wu Z., Ye Z., Wang C. Influence of ceramic coating pores on the Tribological performance of PEO–PTFE composite coatings on the Ta–12W alloy. *Surface and Coatings Technology*, 2022, vol. 441, art. ID 128592. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128592>
14. Chen J., Li W., Xu J., Bai Z., Wang C., Wang S. Effect of current density and polytetrafluoroethylene on the properties of micro-arc oxide coating of pure aluminum. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2023, vol. 20, no. 5, pp. 2860–2873. <https://doi.org/10.1111/ijac.14412>
15. Lu C., Feng X., Yang J., Jia J., Yi G., Xie E., Sun Y. Influence of surface microstructure on tribological properties of PEO-PTFE coating formed on aluminum alloy. *Surface and Coatings Technology*, 2019, vol. 364, pp. 127–134. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.02.064>