

УДК 621.893:620.178.162.42

Триботехнические характеристики МДО-покрытий, модифицированных квазикристаллами Al–Cu–Fe

Е.В. Торская¹, А.В. Морозов¹, В.Н. Малышев², О.О. Щербакова¹, Т.И. Муравьева¹

¹Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,
просп. Вернадского, д. 101, корп. 1, г. Москва 119526, Россия

²Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина»,
просп. Ленинский, д. 65, корп. 1, г. Москва 119991, Россия

Поступила в редакцию 12.08.2025.

Модифицирование керамических покрытий, разработанных для узлов трения, является важным направлением исследований с целью улучшения их триботехнических характеристик. В данной работе представлены керамические покрытия, сформированные на алюминиевых сплавах В95 и Д16 методом микродугового оксидирования (МДО) в одностадийном технологическом процессе с включениями квазикристаллов Al–Cu–Fe. Также использовалась технология втирания квазикристаллов в поверхность покрытия при финишной полировке. Испытания на трение и износ проводились согласно стандарту ASTM G99 в паре с шариком из карбида вольфрама. Анализ поверхности и поперечных сечений методом СЭМ-микроскопии показал, что модифицирование влияет на структуру покрытия. Квазикристаллы концентрируются в порах и участвуют в процессе трения. Добавление небольшого количества модификатора в электролит, а также технология втирания позволяют снизить коэффициент трения и скорость износа по сравнению с чисто керамическими покрытиями, полученными на сплаве В95. Большее количество модификатора даёт отрицательный результат. Добавление модификатора в электролит при формировании покрытий на сплаве Д16 приводит к увеличению коэффициента трения и падению износостойкости.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, керамика, покрытие, квазикристаллы, коэффициент трения, износостойкость, структура поверхности трения.

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-4-301-311

Адрес для переписки:

Е.В. Торская
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,
пр. Вернадского, д. 101, корп. 1, г. Москва 119526, Россия
e-mail: torskaya@mail.ru

Address for correspondence:

E.V. Torskaya
Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy
of Sciences (IPMech RAS),
Prospekt Vernadskogo, 101-1, Moscow 119526, Russia
e-mail: torskaya@mail.ru

Для цитирования:

Е.В. Торская, А.В. Морозов, В.Н. Малышев, О.О. Щербакова,
Т.И. Муравьева.

Триботехнические характеристики МДО-покрытий,
модифицированных квазикристаллами Al–Cu–Fe.

Трение и износ.

2025. – Т. 46, № 4. – С. 301–311.

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-4-301-311

For citation:

E.V. Torskaya, A.V. Morozov, V.N. Malyshev, O.O. Shcherbakova,
and T.I. Muravyeva.

[Tribological Characteristics of MAO-Coatings Modified with
Al–Cu–Fe Quasicrystals].

Trenie i Iznos.

2025, vol. 46, no. 4, pp. 301–311 (in Russian).

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-4-301-311

Tribological Characteristics of MAO-Coatings Modified with Al–Cu–Fe Quasicrystals

E.V. Torskaya¹, A.V. Morozov¹, V.N. Malyshev², O.O. Shcherbakova¹, and T.I. Muravyeva¹

¹*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences (IPMech RAS),
Prospekt Vernadskogo, 101-1, Moscow 119526, Russia*

²*National University of Oil and Gas “Gubkin University”,
Leninski Prospekt, 65-1, Moscow 119991, Russia*

Received 12.08.2025.

Abstract

Modification of ceramic coatings developed for friction units is an important area of research aimed at improving their tribological characteristics. This paper presents ceramic coatings formed on aluminum alloys B95 and D16 by the microarc oxidation (MAO) method in a single-stage technological process with inclusions of Al–Cu–Fe quasicrystals. The technology of rubbing quasicrystals into the coating surface during final polishing was also used. Friction and wear tests were carried out according to the ASTM G99 standard paired with a tungsten carbide ball. Analysis of the surface and cross sections by the SEM microscopy method showed that the modification affects the coating structure. Quasicrystals are concentrated in the pores and participate in the friction process. Addition of small amount of modifier to the electrolyte, as well as the rubbing technology, make it possible to reduce the friction coefficient and wear rate compared to purely ceramic coatings obtained on the B95 alloy. A larger amount of modifier gives a negative result. Adding a modifier to the electrolyte when forming coatings on D16 alloy leads to an increase in the friction coefficient and a decrease in wear resistance.

Keywords: microarc oxidation, ceramics, coating, quasicrystals, coefficient of friction, wear resistance, structure of the friction surface.

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-4-301-311

Адрес для переписки:

Е.В. Торская
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,
пр. Вернадского, д. 101, корп. 1, г. Москва 119526, Россия
e-mail: torskaya@mail.ru

Address for correspondence:

E.V. Torskaya
Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy
of Sciences (IPMech RAS),
Prospekt Vernadskogo, 101-1, Moscow 119526, Russia
e-mail: torskaya@mail.ru

Для цитирования:

Е.В. Торская, А.В. Морозов, В.Н. Малышев, О.О. Щербаклова,
Т.И. Муравьева.

Триботехнические характеристики МДО-покрытий,
модифицированных квазикристаллами Al–Cu–Fe.

Трение и износ.

2025. – Т. 46, № 4. – С. 301–311.

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-4-301-311

For citation:

E.V. Torskaya, A.V. Morozov, V.N. Malyshev, O.O. Shcherbakova,
and T.I. Muravyeva.

[Tribological Characteristics of MAO-Coatings Modified with
Al–Cu–Fe Quasicrystals].

Trenie i Iznos.

2025, vol. 46, no. 4, pp. 301–311 (in Russian).

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-4-301-311

Список использованных источников

1. Малышев В.Н., Зорин К.М. Формирование керамических покрытий методом микродугового оксидирования в электролитах-суспензиях // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2006 (11), 34—39
2. Лetyagin Н.В., Акоюн Т.К., Соколев А.А., Цыденов А.Г., Мусин А.Ф., Палкин П.А. Структура и свойства покрытий, формируемых методом плазменного электролитического оксидирования на литых Al-Ca сплавах // Металлург. — 2023 (10), 43—49
3. Злотников И.И., Шаповалов В.М. Повышение антифрикционных свойств керамических покрытий, полученных методом МДО на алюминиевых сплавах // Трение и износ. — 2019 (40), № 5, 468—472
4. Lu X., Mohedano M., Blawert C., Matykina E., Arrabal R., Kainer K.U., Zheludkevich M.I. Плазменно-электролитические оксидные покрытия с добавками частиц - обзор // Поверхность и покрытия [Coatings Technology]. — 2016 (307), 1165—1182
5. Криштал М.М., Ивашин П.В., Растегаев И.А., Полунин А.В., Боргардт Е.Д. Влияние легирования электролита наноразмерным диоксидом кремния на трибологические характеристики оксидных слоев, сформированных микродуговым оксидированием на алюминиево-кремниевом сплаве // Вектор науки ТГУ. — 2014 (1), 48—52
6. Pakhomov M.A., Stolyarov V.V., Mezrin A.M., and Torskaya E.V. Effect of Graphene and Temperature on Friction Coefficient of Nanocomposite Al₂O₃ / Graphene Journal of Physics: Conference Series. — Bristol, UK: IOP Publishing. — 2021 (1967), 012028
7. Qi X., Li J., He Y., Liu Y., Liu R., and Song R. Study on the Wear Resistance and Corrosion Behaviour of Self-Sealed MAO/ZrO₂ Coatings Prepared on 7075 Aluminium Alloy // Journal of Alloys and Compounds. — 2023 (969), 172436
8. Cai H., Zhang C., Li H., and Jiang B. Self-Lubricating Nanocomposite Coatings Using MAO to Improve Tribological Properties of 6061 Aluminum Alloy // Citation Hailong Cai. Materials Research Express. — 2021 (8), 036401
9. Sunilraj S., Blessto B., Sivaprasad K., and Muthupandi V. Microstructural and Corrosion Behavior of MAO Coated 5052 Aluminum Alloy // Materials Today: Proceedings. — 2021 (41), no. 5, 1120—1124
10. Lu X., Mohedano M., Blawert C., Matykina E. et al. Plasma Electrolytic Oxidation Coatings with Particle Additions // A Review. Surface and Coatings Technology. — 2016 (307), 1165—1182
11. Torskaya E., Shkalei I., Morozov A., Stepanov F., Malyshev V., and Svistkov A. Structure, Friction and Wear of AlZn5.5MgCu Based PEO Coatings Modified by Diamond Nanoparticles and Silver

- Micropowder // Tribology International. — 2025 (203), 110417
12. Yadav T.P. and Mukhopadhyay N.K. Quasicrystal: a Low-Frictional Novel Material // Current Opinion in Chemical Engineering. — 2018 (19), 163—169
13. Sordellet D.J., Widener S.D., Tang Y., and Besser M.F. / Characterization of a Commercially Produced Al-Cu-Fe-Cr Quasicrystalline Coating // Materials Science and Engineering. — 2000 (294-296), no. 15, 834—837
14. Huttunen-Saarivirta E. Microstructure, Fabrication and Properties of Quasicrystalline Al-Cu-Fe Alloys: a Review // Journal of Alloys and Compounds. — 2004 (363), 150—174
15. Fleury E., Kim Y.-C., Kim J.-S., Kim D.-H., Kim W.T., Ahn H.-S., and Lee S.-M. Comparative Study of the Tribological Behavior of Thermal Sprayed Quasicrystalline Coating Layers // Journal of Alloys and Compounds. — 2002 (342), nos. 1-2, 321—325

References

1. Malyshev V.N., Zorin K.M. Formation of ceramic coatings by microarc oxidation in electrolyte suspensions // Hardening technologies and coatings. — 2006 (11), 34—39 (in Russian)
2. Letyagin N.V., Akopyan T.K., Sokorev A.A., Tsydenov A.G., Musin A.F., Palkin P.A. Structure and properties of coatings formed by plasma electrolytic oxidation on cast Al-Ca alloys // Metallurgist. — 2023 (10), 43—49 (in Russian)
3. Zlotnikov I.I. and Shapovalov V.M. Improving the Antifriction Properties of Ceramic Coatings Obtained by the MAO Method on Aluminum Alloys // Friction and Wear. — 2019 (40), no. 5, 468—472 (in Russian)
4. Lu X., Mohedano M., Blawert C., Matykina E., Arrabal R., Kainer K.U., and Zheludkevich M.I. Plasma Electrolytic Oxidation Coatings with Particle Additions – A Review // Surface and Coatings Technology. — 2016 (307), 1165—1182. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2016.08.055
5. Krishtal M.M., Ivashin P.V., Rastegaev I.A., Polunin A.V., Borgardt E.D. Effect of alloying the electrolyte with nanosized silicon dioxide on the tribological characteristics of oxide layers formed by microarc oxidation on an aluminum-silicon alloy // Vector of Science TSU. — 2014 (1), 48—52 (in Russian)
6. Pakhomov M.A., Stolyarov V.V., Mezrin A.M., and Torskaya E.V. Effect of Graphene and Temperature on Friction Coefficient of Nanocomposite Al₂O₃ / Graphene Journal of Physics: Conference Series. — Bristol, UK: IOP Publishing. — 2021 (1967), 012028
7. Qi X., Li J., He Y., Liu Y., Liu R., and Song R. Study on the Wear Resistance and Corrosion Behaviour of Self-Sealed MAO/ZrO₂ Coatings Prepared on 7075 Aluminium Alloy // Journal of Alloys and Compounds. — 2023 (969), 172436

8. **Cai H., Zhang C., Li H., and Jiang B.** Self-Lubricating Nanocomposite Coatings Using MAO to Improve Tribological Properties of 6061 Aluminum Alloy // Citation Hailong Cai. Materials Research Express. — 2021 (8), 036401
9. **Sunilraj S., Blessto B., Sivaprasad K., and Muthupandi V.** Microstructural and Corrosion Behavior of MAO Coated 5052 Aluminum Alloy // Materials Today: Proceedings. — 2021 (41), no. 5, 1120—1124
10. **Lu X., Mohedano M., Blawert C., Matykina E. et al.** Plasma Electrolytic Oxidation Coatings with Particle Additions // A Review. Surface and Coatings Technology. — 2016 (307), 1165—1182
11. **Torskaya E., Shkalei I., Morozov A., Stepanov F., Malyshev V., and Svistkov A.** Structure, Friction and Wear of AlZn5.5MgCu Based PEO Coatings Modified by Diamond Nanoparticles and Silver Micropowder // Tribology International. — 2025 (203), 110417
12. **Yadav T.P. and Mukhopadhyay N.K.** Quasicrystal: a Low-Frictional Novel Material // Current Opinion in Chemical Engineering. — 2018 (19), 163—169
13. **Sordelet D.J., Widener S.D., Tang Y., and Besser M.F.** / Characterization of a Commercially Produced Al–Cu–Fe–Cr Quasicrystalline Coating // Materials Science and Engineering. — 2000 (294–296), no. 15, 834—837
14. **Huttunen-Saarivirta E.** Microstructure, Fabrication and Properties of Quasicrystalline Al–Cu–Fe Alloys: a Review // Journal of Alloys and Compounds. — 2004 (363), 150—174
15. **Fleury E., Kim Y.-C., Kim J.-S., Kim D.-H., Kim W.T., Ahn H.-S., and Lee S.-M.** Comparative Study of the Tribological Behavior of Thermal Sprayed Quasicrystalline Coating Layers // Journal of Alloys and Compounds. — 2002 (342), nos. 1–2, 321—325

Для приобретения полного текста статьи, обращайтесь в редакцию журнала.

Адрес редакции: 246050, ул. Кирова 32а, г. Гомель, Беларусь. Телефон/факс: +375 (232) 34 06 36 / 34 17 11

Full text of articles can be purchased from the editorial office.

Address: 32a Kirov Street, Gomel, Belarus, 246050. Phone: +375 (232) 34 06 36. Fax: +375 (232) 34 17 11

E-mail: FWJ@tut.by