

УДК 621.762; 537.523.4

Износостойкость Ti-Mo-Si покрытий, формируемых методом электроискрового легирования на титановом сплаве Ti-6Al-4V

А.А. Бурков¹, М.А. Кулик¹, А.Ю. Быцур¹, В.О. Крутикова²

¹Хабаровский Федеральный исследовательский центр ДВО РАН,
ул. Тихоокеанская, 153, г. Хабаровск 680042, Россия

²Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН,
г. Хабаровск, Россия

Поступила в редакцию 01.08.2024.

После доработки 05.02.2025.

Принята к публикации 14.02.2025.

Исследовались Ti-Mo-Si покрытия для защиты титанового сплава Ti-6Al-4V от изнашивания и высокотемпературного окисления нанесённые методом электроискрового легирования. Для формирования Ti-Mo-Si покрытия использовался нелокализованный электрод, состоящий из титановых гранул с добавлением порошков кремния и молибдена. Для изучения фазового состава покрытий применяли рентгеновский дифрактометр Дрон-7 в CuK_α излучении. Согласно данным рентгенофазового анализа в составе покрытий обнаружены фазы αTi , Mo, Ti_5Si_3 и TiSi_2 . Средняя толщина, приготовленный покрытий, находилась в диапазоне от 31,70 до 40,97 мкм. По данным энергодисперсионного анализа в составе покрытий преобладал титан, концентрация молибдена достигала 18 ат. %, а кремния — 9 ат. %. Показано, что частицы кремния непропорционально меньше участвовали в формировании покрытия по сравнению с частицами молибдена. Испытание на жаростойкость показало, что применение разработанных Ti-Mo-Si покрытий позволяет повысить жаростойкость титанового сплава Ti-6Al-4V при температуре 900 °С до 5,7 раза. Микротвёрдость поверхности Ti-Mo-Si покрытий находилась в диапазоне от 5,81 до 9,88 ГПа. Установлено, что с ростом соотношения кремния к молибдену в нелокализованном электроде, средние значения коэффициента трения покрытий в режиме сухого скольжения монотонно повышались от 0,81 до 0,86. Применение Ti-Mo-Si покрытий позволяет снизить износ поверхности изделий из титанового сплава до 19 раз. Наибольшую твёрдость, износостойкость и жаростойкость продемонстрировало покрытие с наибольшим содержанием кремния.

Ключевые слова: Ti-Mo-Si покрытие, электроискровое легирование, износ, жаростойкость, твердость, сплав Ti-6Al-4V.

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-1-15-25

Адрес для переписки:

М.А. Кулик
Хабаровский Федеральный исследовательский центр ДВО РАН,
ул. Тихоокеанская, 153, г. Хабаровск 680042, Россия
e-mail: marijka80@mail.ru

Для цитирования:

А.А. Бурков, М.А. Кулик, А.Ю. Быцур, В.О. Крутикова.
Износостойкость Ti-Mo-Si покрытий, формируемых методом электроискрового легирования на титановом сплаве Ti-6Al-4V. Трение и износ. 2025. — Т. 46, № 1. — С. 15–25.
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-1-15-25

Address for correspondence:

M.A. Kulik
Khabarovsk Federal Research Center FEB RAS,
Tikhookeanskaya Str., 153, Khabarovsk 680042, Russia
e-mail: marijka80@mail.ru

For citation:

A.A. Burkov, M.A. Kulik, A.Y. Bytsura, and V.O. Krutikova.
[Wear Resistance of Ti-Mo-Si Coatings Formed by Electrospark Alloying on Titanium Alloy Ti-6Al-4V].
Trenie i Iznos. 2025, vol. 46, no. 1, pp. 15–25 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-1-15-25

Wear Resistance of Ti-Mo-Si Coatings Formed by Electrospark Alloying on Titanium Alloy Ti-6Al-4V

A.A. Burkov¹, M.A. Kulik¹, A.Y. Bytsura¹, and V.O. Krutikova²

¹*Khabarovsk Federal Research Center FEB RAS,
Tikhookeanskaya Str., 153, Khabarovsk 680042, Russia*

²*Institute of Tectonics and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
Khabarovsk, Russia*

Received 01.08.2024.

Revised 05.02.2025.

Accepted 14.02.2025.

Abstract

Ti-Mo-Si coatings were prepared to protect of the titanium alloy Ti-6Al-4V from wear and high-temperature oxidation by the electrospark deposition method was investigated. To form the Ti-Mo-Si coating, a non-localized electrode consisting of titanium granules with the addition of silicon and molybdenum powders was used. The aim of the work is to study the influence of the silicon and molybdenum ratio in the non-localized electrode on the character of mass transfer during the electrospark deposition Ti-Mo-Si coatings, their composition, microstructure, oxidation resistance and tribological properties. To study the phase composition of the coatings, a Dron-7 X-ray diffractometer in CuK_α radiation was used. According to the X-ray phase analysis data, the phases of αTi , Mo, Ti_5Si_3 and TiSi_2 were found in the composition of the coatings. The average thickness of the prepared coatings was in the range from 31.70 to 40.97 μm . According to the energy-dispersive analysis data, titanium predominated in the composition of the coatings, the molybdenum concentration reached 18 at. %, and silicon — 9 at. %. It is shown that silicon particles participated disproportionately less in the coating formation compared to molybdenum particles. Oxidation resistance testing showed that the use of the developed Ti-Mo-Si coatings allows increasing the high temperature oxidation resistance of the titanium alloy Ti-6Al-4V at a temperature of 900 °C by up to 5.7 times. The microhardness of the Ti-Mo-Si coating surface was in the range from 5.81 to 9.88 GPa. It was found that with an increase in the silicon to molybdenum ratio in the non-localized electrode, the average values of the friction coefficient of the coatings in the dry sliding mode monotonically increased from 0.81 to 0.86. The use of Ti-Mo-Si coatings allows reducing the surface wear of titanium alloy products by up to 19 times. The highest hardness, wear resistance and oxidation resistance were demonstrated by the coating with the highest silicon content.

Keywords: coating Ti-Mo-Si, electric spark deposition, wear, oxidation resistance, hardness, Ti-6Al-4V.

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-1-15-25

Адрес для переписки:

М.А. Кулик
Хабаровский Федеральный исследовательский центр ДВО РАН,
ул. Тихоокеанская, 153, г. Хабаровск 680042, Россия
e-mail: marijka80@mail.ru

Для цитирования:

А.А. Бурков, М.А. Кулик, А.Ю. Быцур, В.О. Крутикова.
Износостойкость Ti-Mo-Si покрытий, формируемых методом
электроискрового легирования на титановом сплаве Ti-6Al-4V.
Трение и износ.
2025. — Т. 46, № 1. — С. 15–25.
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-1-15-25

Address for correspondence:

M.A. Kulik
Khabarovsk Federal Research Center FEB RAS,
Tikhookeanskaya Str., 153, Khabarovsk 680042, Russia
e-mail: marijka80@mail.ru

For citation:

A.A. Burkov, M.A. Kulik, A.Y. Bytsura, and V.O. Krutikova.
[Wear Resistance of Ti-Mo-Si Coatings Formed by Electrospark
Alloying on Titanium Alloy Ti-6Al-4V].
Trenie i Iznos.
2025, vol. 46, no. 1, pp. 15–25 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-1-15-25

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Dai J., Zhu J.Y., Chen C.Z. [et al.]** High Temperature Oxidation Behavior and Research Status of Modifications on Improving High Temperature Oxidation Resistance of Titanium Alloys and Titanium Aluminides: A Review // *Journal of Alloys and Compounds*. — 2016 (685), 784—798
2. **Shafyei H., Salehi M., and Bahrami A.** Fabrication, Microstructural Characterization and Mechanical Properties Evaluation of Ti/TiB/TiB₂ Composite Coatings Deposited on Ti6Al4V Alloy by Electrospark Deposition Method // *Ceramics International*. — 2020 (46), 15276—15284
3. **Кудряшов А.Е., Замулаева Е.И., Кирюханцев-Корнеев Ф.В. [и др.]** Особенности формирования на хромовой подложке электроискровых покрытий при использовании керамических электродов ZrSi₂-MoSi₂-ZrB₂ и HfSi₂-MoSi₂-HfB₂ // *Электронная обработка материалов*. — 2024, № 3, 1—12
4. **Lu Q., Hao Y., Wang Y. [et al.]** Microstructural Evolution and High-Temperature Oxidation Mechanisms of a Ti-Mo-Si Composite // *Corrosion Science*. — 2019 (161), 108180
5. **El-Sayed Seleman M.M., Ataya S., Aly H.A. [et al.]** Effect of the Si Content on the Dry and Wet Sliding Wear Behavior of the Developed Ti-15Mo-(0-2) Si Alloys for Biomedical Applications // *Metals*. — 2023 (13), no. 11, 1861
6. **Li C., Zhan Y., Mo Y., [et al.]** In situ Synthesized Ti₅Si₃/Ti-Mo Lightweight Structural Composites // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. — 2013 (41), 432—436
7. **Li F., Zhang P., Wei D. [et al.]** The Influence of Loading Rate and Hold Time on the Nano-Mechanical Properties of γ -TiAl and Plasma Mo-Si-Ti Coating // *Journal of Materials Engineering and Performance*. — 2022 (31), no. 9, 7368—7381
8. **Li L., Guo X., and Qiao Y.** A Novel Composite Si-Mo-Ti Coating with Ti Concentration Gradient for Nb-Si Based Ultrahigh Temperature Alloy Prepared by Slurry Sintering // *Corrosion Science*. — 2023 (225), 111632
9. **Верхотуров А.Д., Подчерняева И.А., Панашенко В.М., Коневцов Л.А.** Электроискровое легирование титана и его сплавов металлами и композиционными материалами. — Комсомольск на Амуре. — 2014
10. **Николенко С.В., Сюй Н.А., Пугачевский М.А., Меглицкая Л.П.** Создание безвольфрамовых электродов СВС-экструзией для электроискрового легирования стали 45 // *Вестник машиностроения*. — 2013, № 2, 37—42
11. **Бурков А.А., Кулик М.А., Быцур А.Ю., Ермаков М.А.** Осаждение износостойкого Cr-Fe-Al₂O₃ покрытия на сталь 35 с использованием порошка оксида алюминия // *Трение и износ*. — 2023 (44), № 6, 521—531
12. **Burkov A.A., Chigrin P.G., and Dvornik M.I.** Electrospark CuTi Coatings on Titanium Alloy Ti6Al4V: Corrosion and Wear Properties // *Surface and Coatings Technology*. — 2023 (469), 129796
13. **Litvinov E.A., Mesyats G.A., and Proskurovskii D.I.** Field Emission and Explosive Electron Emission Processes in Vacuum Discharges // *Soviet Physics Uspekhi*. — 1983 (26), no. 2, 138
14. **Бурков А.А., Кулик М.А., Крутикова В.О.** Характеристика Ti-Si-покрытий на сплаве Ti6Al4V, осажденных электроискровой обработкой в среде гранул // *Цветные металлы*. — 2019 (4), 54—59
15. **Li F., Rawat R.S., Zhang P. [et al.]** Mechanical Properties and Reciprocating Sliding Tribological Behaviors of γ -TiAl Substrate and Plasma-Based Mo-Si-Ti Coating // *Journal of Materials Research and Technology*. — 2023 (26), 1469—1483

References

1. **Dai J., Zhu J.Y., Chen C.Z. [et al.]** High Temperature Oxidation Behavior and Research Status of Modifications on Improving High Temperature Oxidation Resistance of Titanium Alloys and Titanium Aluminides: A Review // *Journal of Alloys and Compounds*. — 2016 (685), 784—798
2. **Shafyei H., Salehi M., and Bahrami A.** Fabrication, Microstructural Characterization and Mechanical Properties Evaluation of Ti/TiB/TiB₂ Composite Coatings Deposited on Ti6Al4V Alloy by Electrospark Deposition Method // *Ceramics International*. — 2020 (46), 15276—15284
3. **Kudryashov A.E., Zamulaeva E.I., Kiryukhantsev-Korneev F.V. [et al.]** Features of the formation of electrospark coatings on a chromium substrate using ceramic electrodes ZrSi₂-MoSi₂-ZrB₂ and HfSi₂-MoSi₂-HfB₂ // *Electronic processing of materials*. — 2024, no. 3, 1—12 (in Russian)
4. **Lu Q., Hao Y., Wang Y. [et al.]** Microstructural Evolution and High-Temperature Oxidation Mechanisms of a Ti-Mo-Si Composite // *Corrosion Science*. — 2019 (161), 108180
5. **El-Sayed Seleman M.M., Ataya S., Aly H.A. [et al.]** Effect of the Si Content on the Dry and Wet Sliding Wear Behavior of the Developed Ti-15Mo-(0-2) Si Alloys for Biomedical Applications // *Metals*. — 2023 (13), no. 11, 1861
6. **Li C., Zhan Y., Mo Y., [et al.]** In situ Synthesized Ti₅Si₃/Ti-Mo Lightweight Structural Composites // *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. — 2013 (41), 432—436
7. **Li F., Zhang P., Wei D. [et al.]** The Influence of Loading Rate and Hold Time on the Nano-Mechanical Properties of γ -TiAl and Plasma Mo-Si-Ti Coating // *Journal of Materials Engineering and Performance*. — 2022 (31), no. 9, 7368—7381
8. **Li L., Guo X., and Qiao Y.** A Novel Composite Si-Mo-Ti Coating with Ti Concentration Gradient for

- Nb-Si Based Ultrahigh Temperature Alloy Prepared by Slurry Sintering // Corrosion Science. — 2023 (225), 111632
9. **Verkhoturov A.D., Podchernyaeva I.A., Panashenko V.M., Konevtsov L.A.** Electrospark deposition of titanium and its alloys with metals and composite materials. — Komsomolsk-on-Amur. — 2014 (in Russian)
 10. **Nikolenko R.R., Syui N.A., Pugachevskiy M.A., Metlitskaya L.P.** The development of non-tungsten electrodes by SHS extrusion for electrospark deposition addition of medium alloy steel // Bulletin of mechanical engineering. — 2013, № 2, 37—42 (in Russian)
 11. **Burkov A.A., Kulik M.A., Bytsura A.Y., and Ermakov M.A.** Wear-Resistant Cr-Fe-Al₂O₃ Coating Deposition on Steel 35 Using Aluminum Oxide Powder // Journal of Friction and Wear. — 2023 (44), no. 6, 346—353
 12. **Burkov A.A., Chigrin P.G., and Dvornik M.I.** Electrospark CuTi Coatings on Titanium Alloy Ti6Al4V: Corrosion and Wear Properties // Surface and Coatings Technology. — 2023 (469), 129796
 13. **Litvinov E.A., Mesyats G.A., and Proskurovskii D.I.** Field Emission and Explosive Electron Emission Processes in Vacuum Discharges // Soviet Physics Uspekhi. — 1983 (26), no. 2, 138
 14. **Burkov A.A., Kulik M.A., Krutikova V.O.** Characteristics of Ti-Si Coatings on Ti6Al4V Alloy Subjected to Electrospark Granules Deposition // Tsvetnye Metally. — 2019 (4), 54—59 (in Russian)
 15. **Li F., Rawat R.S., Zhang P. [et al.]** Mechanical Properties and Reciprocating Sliding Tribological Behaviors of γ -TiAl Substrate and Plasma-Based Mo-Si-Ti Coating // Journal of Materials Research and Technology. — 2023 (26), 1469—1483

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