

УДК 621.793.14

Триботехнические характеристики вакуумно-дуговых покрытий Mo–S–Ti–C на титановом сплаве VT5, сформированных при ассистирующем воздействии газоразрядной плазмы

А.А. Леонов¹, В.М. Савостиков¹, В.В. Денисов¹, Ю.А. Денисова¹, М.А. Химич^{2,3},
А.Б. Скосырский^{1,2}

¹Институт сильноточной электроники СО РАН,
пр. Академический, 2/3, г. Томск 634055, Россия

²Национальный исследовательский Томский государственный университет,
пр. Ленина, 36, г. Томск 634050, Россия

³Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
пр. Академический, 2/4, г. Томск 634055, Россия

Поступила в редакцию 31.03.2025.

Цель работы — определение наиболее рациональных условий и режимов синтеза Mo–S–Ti–C-покрытий на титановом сплаве VT5, обеспечивающих наилучшие триботехнические характеристики.

Покрытия наносили вакуумно-дуговым испарением катодов на модернизированной установке ННВ-6.6-И1. Катоды изготавливали методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Ассистирующее воздействие газоразрядной плазмы при нанесении покрытия обеспечивалось автономным плазменным источником с накаливаемым катодом. При этом варьировали потенциал смещения на подложке, время осаждения, состав рабочей газовой среды — аргон и/или смесь аргона с азотом в соотношении 1:1.

Установлено, что воздействие газоразрядной плазмы на покрытия обеспечивает 2—3-х кратное повышение их твёрдости. Методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии выявлено наличие в катодах и в покрытиях элементов Mo, S и Ti, C, образующих сульфиды и твёрдые карбиды соответственно. Рентгеноструктурный анализ подтвердил синтез соединений по типу Mo₂S₃ и TiC и в катодах, и в покрытиях. Наиболее эффективный вариант покрытия, полученного с применением смеси аргона и азота содержит упрочняющую фазу TiN. Триботехнические испытания проводили при трении без смазочного материала. Установлено, что наиболее эффективный вариант покрытия с добавлением азота в плазме, по сравнению с исходным сплавом VT5, показал снижение коэффициента трения при нагрузке на контртело 1 Н — в 2 раза, при нагрузке 5 Н — в 3 раза; показатель износа в обоих случаях уменьшился на порядок и более. Таким образом, такой технологический способ обеспечивает формирование градиентно-слоистого покрытия и представляется перспективным для промышленного применения.

Ключевые слова: коэффициент трения, износ, вакуумно-дуговое осаждение, газоразрядная плазма, многокомпонентное покрытие.

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-3-223-230

Адрес для переписки:

А.А. Леонов
Институт сильноточной электроники СО РАН,
пр. Академический, 2/3, г. Томск 634055, Россия
e-mail: laa-91@yandex.ru

Address for correspondence:

A.A. Leonov
Institute of High Current Electronics Siberian Branch of Russian
Academy of Sciences,
Academicheskyy ave., 2/3, Tomsk 634055, Russia
e-mail: laa-91@yandex.ru

Для цитирования:

А.А. Леонов, В.М. Савостиков, В.В. Денисов, Ю.А. Денисова,
М.А. Химич, А.Б. Скосырский.
Триботехнические характеристики вакуумно-дуговых покрытий
Mo–S–Ti–C на титановом сплаве VT5, сформированных при
ассистирующем воздействии газоразрядной плазмы.
Трение и износ.
2025. — Т. 46, № 3. — С. 223–230.
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-3-223-230

For citation:

A.A. Leonov, V.M. Savostikov, V.V. Denisov, Yu.A. Denisova,
M.A. Khimich, and A.B. Skosyrskii.
[Tribotechnical Characteristics of Vacuum-Arc Coatings Mo–S–Ti–C
on Titanium Alloy VT5, Formed with Assistant Influence of
Gas-Discharge Plasma].
Trenie i Iznos.
2025, vol. 46, no. 3, pp. 223–230 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-3-223-230

Tribotechnical Characteristics of Vacuum-Arc Coatings Mo–S–Ti–C on Titanium Alloy VT5, Formed with Assistant Influence of Gas-Discharge Plasma

A.A. Leonov¹, V.M. Savostikov¹, V.V. Denisov¹, Yu.A. Denisova¹, M.A. Khimich^{2,3}, and A.B. Skosyrskii^{1,2}

¹*Institute of High Current Electronics Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Academicheskoy ave., 2/3, Tomsk 634055, Russia*

²*National Research Tomsk State University, Lenina ave., 36, Tomsk 634050, Russia*

³*Institute of Strength Physics and Materials Science Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Academicheskoy ave., 2/4, Tomsk 634055, Russia*

Received 31.03.2025.

Abstract

The aim of the work is to identify the most effective conditions and modes for the synthesis of Mo–S–Ti–C coatings on titanium alloy VT5, providing the best tribological characteristics.

The coatings were applied by vacuum arc evaporation of cathodes on a modernized NNV-6.6-II installation. The cathodes were produced using self-propagating high-temperature synthesis. Assistance to the gas discharge plasma during coating application was provided by an autonomous plasma source with a heated cathode. In this case, the bias potential on the substrate, the deposition time, and the composition of the working gas environment — argon and/or a mixture of argon and nitrogen in a ratio of 1:1 — were varied.

It has been established that the use of assisting action of gas discharge plasma on deposited coatings provides a 2—3 times increase in their hardness. Using energy-dispersive X-ray spectroscopy, the presence of both sulfide-forming elements (Mo, S) and elements capable of forming solid carbides (Ti, C) was revealed in the evaporated cathodes and in the applied coatings. X-ray structural analysis confirmed the synthesis of compounds of the Mo₂S₃ and TiC type in both cathodes and coatings. In the most effective version of a three-layer coating using, along with argon, additionally nitrogen in gas discharge plasma, the formation of a strengthening phase TiN was also recorded. Tribological tests were carried out under friction conditions without lubricant. It was established that the most effective version of a three-layer coating with the addition of nitrogen in a gas discharge plasma, compared to the initial VT5 alloy, showed a decrease in the friction coefficient under a load on the counterbody of 1 N — by 2 times, under a load of 5 N — by 3 times; the wear rate in both cases decreased by an order of magnitude or more. Thus, the presented technological method ensures the formation of a gradient-layered coating architecture and appears promising for industrial application.

Keywords: friction coefficient, wear, vacuum arc deposition, gas discharge plasma, multicomponent coating.

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-3-223-230

Адрес для переписки:

А.А. Леонов
Институт сильноточной электроники СО РАН,
пр. Академический, 2/3, г. Томск 634055, Россия
e-mail: laa-91@yandex.ru

Address for correspondence:

A.A. Leonov
Institute of High Current Electronics Siberian Branch of Russian
Academy of Sciences,
Academicheskoy ave., 2/3, Tomsk 634055, Russia
e-mail: laa-91@yandex.ru

Для цитирования:

А.А. Леонов, В.М. Савостиков, В.В. Денисов, Ю.А. Денисова,
М.А. Химич, А.Б. Скосырский.
Триботехнические характеристики вакуумно-дуговых покрытий
Mo–S–Ti–C на титановом сплаве VT5, сформированных при
ассистирующем воздействии газоразрядной плазмы.
Трение и износ.
2025. — Т. 46, № 3. — С. 223–230.
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-3-223-230

For citation:

A.A. Leonov, V.M. Savostikov, V.V. Denisov, Yu.A. Denisova,
M.A. Khimich, and A.B. Skosyrskii.
[Tribotechnical Characteristics of Vacuum-Arc Coatings Mo–S–Ti–C
on Titanium Alloy VT5, Formed with Assistant Influence of
Gas-Discharge Plasma].
Trenie i Iznos.
2025, vol. 46, no. 3, pp. 223–230 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-3-223-230

Список использованных источников

1. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. — М.: Машиностроение. — 1977
2. Renevier N.M., Hampshire J., Fox V.C. [et al.]. Advantages of Using Self-Lubricating, Hard, Wear-Resistant MoS₂-Based Coatings // Surf. Coat. Technol. — 2001 (**142-144**), 67—77. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01108-2](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01108-2)
3. Rahman M., Haider J., Dowling D.P. [et al.]. Deposition of Magnetron Sputtered TiN + MoS_x Coating with Ti–TiN Graded Interlayer // Surf. Coat. Technol. — 2005 (**200**), 1071—1075. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.02.096>
4. Gangopadhyay S., Acharya R., Chattopadhyay A.K., and Paul S. Composition and Structure–Property Relationship of Low Friction, Wear Resistant TiN–MoS_x Composite Coating Deposited by Pulsed Closed-Field Unbalanced Magnetron Sputtering // Surf. Coat. Technol. — 2009 (**203**), 1565—1572. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.11.004>
5. Li X., Zhang Y., Ji L. [et al.]. Tribological Properties and Wear Mechanism of Molybdenum Disulfide–Carbon Composite Film under Low Temperature in Vacuum // Trib. Int. — 2024 (**199**), 109926. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109926>
6. Ren Y., Niu Y., Jia J. [et al.]. Design and Tribological Performance of CrN/Mo₂N/MoS_x Composite Coating in Wide Temperature Range Inspired by Oxidation Kinetics Principle // Trib. Int. — 2023 (**180**), 108229. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108229>
7. Ju S., Ji L., Liu X. [et al.]. The Effect of LaF₃ in Enhancing the Atomic-Oxygen-Resistance of Molybdenum–Disulfide–Based Solid Lubricant Films // Trib. Int. — 2024 (**192**), 109259. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109259>
8. Chen H., Wang W., Le K. [et al.]. Effects of Substrate Roughness on the Tribological Properties of Duplex Plasma Nitrided and MoS₂ Coated Ti₆Al₄V Alloy // Trib. Int. — 2024 (**191**), 109123. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.109123>
9. Прожега М.В., Решиков Е.О., Константинов Е.О. [и др.]. Трибологические свойства антифрикционных покрытий на основе дисульфида молибдена в экстремальных условиях // Трение и износ. — 2022 (**43**), № 6, 640—650. DOI: 10.32864/0202-4977-2022-43-6-640-650
10. Способ нанесения антифрикционного износостойкого покрытия на титановые сплавы: патент РФ на изобретение. RU 2502828 С1. 27.12.2013. / В.М. Савостиков, А.Н. Табаченко, А.И. Потекаев, Е.Ф. Дударев
11. Savostikov V.M., Leonov A.A., Denisov V.V. [et al.]. Formation of a Zr+Zr_xN_y+(Zr+TiBSiNi)N+(TiB–SiNi)N Gradient-Layered Coating Based on Physical and Tribotechnical Characteristics of Constituent Layers // Russ. Phys. J. — 2024(**67**), 1090—1099. <https://doi.org/10.1007/s11182-024-03220-2>

References

1. Kragel'skiy I.V., Dobychin M.N., Kombalov V.S. Osnovy raschetov potreniyu i iznosu. — Moskva: Mashinostroyeniye. — 1977 (in Russian)
2. Renevier N.M., Hampshire J., Fox V.C. [et al.]. Advantages of Using Self-Lubricating, Hard, Wear-Resistant MoS₂-Based Coatings // Surf. Coat. Technol. — 2001 (**142-144**), 67—77. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01108-2](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01108-2)
3. Rahman M., Haider J., Dowling D.P. [et al.]. Deposition of Magnetron Sputtered TiN + MoS_x Coating with Ti–TiN Graded Interlayer // Surf. Coat. Technol. — 2005 (**200**), 1071—1075. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.02.096>
4. Gangopadhyay S., Acharya R., Chattopadhyay A.K., and Paul S. Composition and Structure–Property Relationship of Low Friction, Wear Resistant TiN–MoS_x Composite Coating Deposited by Pulsed Closed-Field Unbalanced Magnetron Sputtering // Surf. Coat. Technol. — 2009 (**203**), 1565—1572. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.11.004>
5. Li X., Zhang Y., Ji L. [et al.]. Tribological Properties and Wear Mechanism of Molybdenum Disulfide–Carbon Composite Film under Low Temperature in Vacuum // Trib. Int. — 2024 (**199**), 109926. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109926>
6. Ren Y., Niu Y., Jia J. [et al.]. Design and Tribological Performance of CrN/Mo₂N/MoS_x Composite Coating in Wide Temperature Range Inspired by Oxidation Kinetics Principle // Trib. Int. — 2023 (**180**), 108229. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108229>
7. Ju S., Ji L., Liu X. [et al.]. The Effect of LaF₃ in Enhancing the Atomic-Oxygen-Resistance of Molybdenum–Disulfide–Based Solid Lubricant Films // Trib. Int. — 2024 (**192**), 109259. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109259>
8. Chen H., Wang W., Le K. [et al.]. Effects of Substrate Roughness on the Tribological Properties of Duplex Plasma Nitrided and MoS₂ Coated Ti₆Al₄V Alloy // Trib. Int. — 2024 (**191**), 109123. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.109123>
9. Prozhega M.V., Reshchikov Ye.O., Konstantinov Ye.O. [i dr.] Tribologicheskiye svoystva antifriktsionnykh pokrytiy na osnove disulfidamolibdena v ekstremal'nykh usloviyakh // Treniye i iznos. — 2022 (**43**), № 6, 640—650. DOI: 10.32864/0202-4977-2022-43-6-640-650 (in Russian)
10. Sposob naneseniya antifriktsionnogo iznosostoykogo pokrytiya na titanovyye splavy: patent RF na izobreteniyе. RU 2502828 S1. 27.12.2013. / V.M. Savostikov, A.N. Tabachenko, A.I. Potekayev, Ye.F. Dudarev (in Russian)
11. Savostikov V.M., Leonov A.A., Denisov V.V. [et al.]. Formation of a Zr+Zr_xN_y+(Zr+TiBSiNi)N+(TiB–SiNi)N Gradient-Layered Coating Based on Physical and Tribotechnical Characteristics of Constituent Layers // Russ. Phys. J. — 2024(**67**), 1090—1099. <https://doi.org/10.1007/s11182-024-03220-2>

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