

УДК 621.793.182:621.7-4 + 621.893

Исследование триботехнических характеристик покрытий дискретной структуры в условиях вакуума

А.И. Беликов, М.А. Братченко, А.И. Илларионов, С.Д. Карпухин

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
2-я Бауманская ул., 5, г. Москва 107005, Россия

Поступила в редакцию 04.08.2025.

В работе представлены результаты исследования в вакууме триботехнических характеристик упрочняющих дискретных покрытий, а также композиционных покрытий на их основе, с добавлением слоя твёрдосмазочного покрытия. Предметом исследования являются дискретные покрытия на основе тонких плёнок TiBN, которые формировали методом магнетронного распыления с осаждением потока материала через фоторезистивные маски различной геометрической конфигурации и с использованием технологии взрывной фотолитографии. Композиционные покрытия формировали магнетронным осаждением на дискретное TiBN-покрытие слоя твёрдосмазочного покрытия MoS₂. В работе оценивали влияние геометрических параметров дискретной структуры (характерный размер дискретных элементов, сплошность покрытия и толщина) на износостойкость и коэффициент трения (КТ), а также особенности разрушения рассматриваемых покрытий при трении в условиях вакуума при высокой нагрузке.

В качестве подложек под покрытия использовали пластинки из листовой стали 12X18H10T. Триботехнические испытания образцов с покрытиями проводили на высоковакуумном стенде по схеме «сфера—плоскость» с использованием тензометрической измерительной системы. Для анализа морфологических особенностей следов разрушения на дорожках трения применяли растровую электронную микроскопию. В работе использовали дискретные покрытия TiBN с характерным размером дискретных элементов от 460 мкм до 805 мкм и значениями сплошности от 0,25 до 0,7; покрытия имели толщину в диапазоне от 0,88 мкм до 2,11 мкм.

Результаты работы свидетельствуют о существенном влиянии параметров дискретной структуры покрытия на триботехнические характеристики. Образцы с дискретами диаметром 700 мкм, толщиной 1 мкм и сплошностью 0,6 демонстрировали наилучшую износостойкость и более стабильный КТ. Использование твёрдосмазочного слоя MoS₂ существенно снижает КТ до 0,03—0,07 и стабилизирует его при длительной работе в вакууме.

Предложенные покрытия могут использоваться для повышения ресурса компонентов вакуумной и космической техники.

Ключевые слова: инженерия поверхности, трибология, коэффициент трения, дискретные покрытия, упрочняющие покрытия, вакуум, MoS₂.

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-5-458-466

Адрес для переписки:

А.И. Беликов
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
2-я Бауманская ул., 5, г. Москва 107005, Россия
e-mail: belikov@bmsu.ru

Address for correspondence:

A.I. Belikov
Bauman Moscow State Technical University,
2-nd Baumanskaya st., 5, Moscow 107005, Russia
e-mail: belikov@bmsu.ru

Для цитирования:

А.И. Беликов, М.А. Братченко, А.И. Илларионов, С.Д. Карпухин.
Исследование триботехнических характеристик покрытий дискретной структуры в условиях вакуума.
Трение и износ.
2025. — Т. 46, № 5. — С. 458—466.
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-5-458-466

For citation:

A.I. Belikov, M.A. Bratchenko, A.I. Illarionov, and S.D. Karpukhin.
[Study of the Tribological Characteristics of Discrete Structure Coatings under Vacuum Conditions].
Trenie i Iznos.
2025, vol. 46, no. 5, pp. 458—466 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-5-458-466

Study of the Tribological Characteristics of Discrete Structure Coatings under Vacuum Conditions

A.I. Belikov, M.A. Bratchenko, A.I. Illarionov, and S.D. Karpukhin

Bauman Moscow State Technical University,
2-nd Baumanskaya st., 5, Moscow 107005, Russia

Received 04.08.2025.

Abstract

The study presents the results of an investigation into the tribological properties of hardening discrete coatings in vacuum, as well as composite coatings based on them with the addition of a solid lubricant layer. The subject of the research is discrete coatings based on thin TiBN films, formed by magnetron sputtering of material through photoresist masks of various geometric configurations, using explosive photolithography technology. Composite coatings were produced by magnetron deposition of a solid lubricant MoS₂ layer onto the discrete TiBN coating. The study evaluates the influence of the discrete structure geometric parameters (characteristic size of discrete elements, coating continuity, and thickness) on wear resistance and the coefficient of friction. It also examines the failure mechanisms of the investigated coatings under high contact loads in vacuum conditions.

Steel plates made from 12Cr18Ni10Ti (AISI 321 equivalent) sheet were used as substrates. The wear-resistant TiBN coatings were deposited by magnetron sputtering of a TiB target in an argon and nitrogen environment. The solid lubricant coatings were deposited by magnetron sputtering of a stoichiometric MoS₂ target in an argon environment. Tribometric tests of the coated samples were carried out using a high-vacuum tribometer equipment in a “sphere-on-flat” configuration, employing a strain gauge measurement system. Scanning electron microscopy was used to analyze the morphological features of wear tracks. Discrete TiBN coatings with characteristic element sizes ranging from 460 μm to 805 μm and continuity values from 0.25 to 0.7 were used in the study; the coating thickness varied from 0.88 μm to 2.11 μm.

The results demonstrate a significant influence of the discrete structure parameters on the tribological performance. Samples with discrete elements of 700 μm in diameter, 1 μm in thickness, and 0.6 continuity showed the best wear resistance and the most stable coefficient of friction. Incorporating a solid lubricant MoS₂ layer into the discrete coating significantly reduced the coefficient of friction to the range of 0.03–0.07 and improved frictional stability during prolonged operation in vacuum.

These findings confirm the promising potential of using discrete hardening coatings combined with solid lubricant layers for tribological units operating in extreme conditions. The proposed approach can be applied to extend the service life of components in vacuum and space equipment.

Keywords: surface engineering, tribology, coefficient of friction, discrete coatings, hardening coatings, vacuum, MoS₂.

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-5-458-466

Адрес для переписки:

А.И. Беликов
Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
2-я Бауманская ул., 5, г. Москва 107005, Россия
e-mail: belikov@bmtu.ru

Address for correspondence:

A.I. Belikov
Bauman Moscow State Technical University,
2-nd Baumanskaya st., 5, Moscow 107005, Russia
e-mail: belikov@bmtu.ru

Для цитирования:

А.И. Беликов, М.А. Братченко, А.И. Илларионов, С.Д. Карпукхин.
Исследование триботехнических характеристик покрытий
дискретной структуры в условиях вакуума.
Трение и износ.
2025. – Т. 46, № 5. – С. 458–466.

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-5-458-466

For citation:

A.I. Belikov, M.A. Bratchenko, A.I. Illarionov, and S.D. Karpukhin.
[Study of the Tribological Characteristics of Discrete Structure
Coatings under Vacuum Conditions].
Trenie i Iznos.
2025, vol. 46, no. 5, pp. 458–466 (in Russian).

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-5-458-466

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Marian M., Berman D., Rota A., Jackson R.L., and Rosenkranz A.** Layered 2D Nanomaterials to Tailor Friction and Wear in Machine Elements – A Review // *Advanced Materials Interfaces*. — 2022 (9), no. 3, 2101622. <https://doi.org/10.1002/admi.202101622>
2. **Serles P., Gaber K., Pajovic S., Colas G., and Filleter T.** High Temperature Microtribological Studies of MoS₂ Lubrication for Low Earth Orbit // *Lubricants*. — 2020 (8), no. 4, 49, <https://doi.org/10.3390/lubricants8040049>.
3. **Беликов А.И., Данилов М.А., Петров В.В., Седых Н.С.** Исследование влияния дискретной структуры на трибологические свойства антифрикционных упрочняющих композитных покрытий // *Упрочняющие технологии и покрытия*. — 2017, № 12, 562—567
4. **Сорока Е.Б.** PVD-покрытия дискретного типа на режущем инструменте // *Металлообработка*. — 2010, № 2, 20—23
5. **Qipeng H., Xiaoliang S., Yawen X., Kaipeng Z., and Chaohua W.** Recent Progress on Surface Texturing and Solid Lubricants in Tribology: Designs, Properties, and Mechanisms // *Materials Today Communications*. — 2023 (35), 105854. ISSN 2352-4928

References

1. **Marian M., Berman D., Rota A., Jackson R.L., and Rosenkranz A.** Layered 2D Nanomaterials to Tailor Friction and Wear in Machine Elements – A Review // *Advanced Materials Interfaces*. — 2022 (9), no. 3, 2101622. <https://doi.org/10.1002/admi.202101622>
2. **Serles P., Gaber K., Pajovic S., Colas G., and Filleter T.** High Temperature Microtribological Studies of MoS₂ Lubrication for Low Earth Orbit // *Lubricants*. — 2020 (8), no. 4, 49, <https://doi.org/10.3390/lubricants8040049>.
3. **Belikov A.I., Danilov M.A., Petrov V.V., Sedych N.S.** Issledovanie vliyaniya diskretnoi struktury na tribologicheskie svoystva antifriktsionnykh uprochnyayushchikh kompozitnykh pokrytiy // *Uprochnyayushchie Tekhnologii i Pokrytiya*. — 2017, no. 12, 562—567 (in Russian)
4. **Soroka E.B.** PVD-pokrytiya diskretnogo tipa na rezhushchem instrumente // *Obrabotka Metallov (Metalloobrabotka)*. — 2010, no. 2, 20—23 (in Russian)
5. **Qipeng H., Xiaoliang S., Yawen X., Kaipeng Z., and Chaohua W.** Recent Progress on Surface Texturing and Solid Lubricants in Tribology: Designs, Properties, and Mechanisms // *Materials Today Communications*. — 2023 (35), 105854. ISSN 2352-4928

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