

УДК 621.793.1+620.178.162

Механизмы износа и методы регулирования износостойкости нанокompозиционных покрытий TiN/AlN трибологического назначения

В.И. Колесников¹, О.В. Кудряков², Д.С. Мантуров¹, В.Н. Варавка², И.В. Колесников¹, Е.С. Новиков¹

¹Ростовский государственный университет путей сообщения,
пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2, г. Ростов-на-Дону 344038, Россия

²Донской государственный технический университет,
пл. Гагарина, 1, г. Ростов-на-Дону 344003, Россия

Поступила в редакцию 25.05.2025.

Проведён анализ износостойкости композиционных TiN/AlN покрытий. Объектом исследования были многослойные 2D-нанокompозиционные покрытия толщиной 0,8—4,0 мкм, нанесенные по вакуумной ионно-плазменной технологии на подложку из стали 40XH2MA. Установлено, что в пределах каждого нитридного слоя покрытия содержит Ti:Al:N = 1:1:2 (ат. %). Структуру покрытий, морфологию дорожек трения, износ исследовали методом сканирующей электронной микроскопии. Твёрдость H и модуль упругости E покрытий определяли по стандартным методикам непрерывного индентирования, триботехнические характеристики (коэффициент трения μ и объёмный износ J) — по схеме «шарик — диск» с круговой траекторией движения шарика-индентора. Анализ полученных данных позволил построить зависимость твёрдости покрытий от их элементного состава, а также показал, что механические характеристики и износостойкость покрытий, напыленных при более низкой температуре 300—350 °С, оказываются стабильно выше, чем напыленных при 400—450 °С. Установлено, что наибольшие значения износа J имеют покрытия с наименьшей толщиной. В связи с этим анализ влияния толщины покрытий δ на их износостойкость проводили, привлекая расчётно-аналитическую модель, на основе которой построены диаграммы критических состояний покрытий TiN/AlN. Диаграммы позволили рассчитать критическое значение толщины покрытия $\delta_{\min}$, при котором изменяется механизм износа. Получено, что при тонком покрытии ($\delta < \delta_{\min}$), расположенном на более «мягкой» (пластичной) подложке, происходит ускоренный износ по абразивно-механическому механизму в силу прогиба и растрескивания покрытия. При относительно толстом покрытии ($\delta \geq \delta_{\min}$) изнашивание происходит по механизму истирания, что для износостойких покрытий существенно продлевает срок службы.

Ключевые слова: вакуумная ионно-плазменная технология, нанокompозиционные покрытия, механические свойства покрытий, трибологические свойства, моделирование, критические состояния, механизмы износа, критерий износостойкости.

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-3-211-222

Адрес для переписки:

О.В. Кудряков
Донской государственный технический университет,
пл. Гагарина, 1, г. Ростов-на-Дону 344003, Россия
e-mail: kudryakov@mail.ru

Address for correspondence:

O.V. Kudryakov
Don State Technical University (DSTU),
Gagarin square, 1, Rostov-on-Don 344000, Russia
e-mail: kudryakov@mail.ru

Для цитирования:

В.И. Колесников, О.В. Кудряков, Д.С. Мантуров, В.Н. Варавка, И.В. Колесников, Е.С. Новиков.
Механизмы износа и методы регулирования износостойкости нанокompозиционных покрытий TiN/AlN трибологического назначения.
Трение и износ.

2025. — Т. 46, № 3. — С. 211—222.

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-3-211-222

For citation:

V.I. Kolesnikov, O.V. Kudryakov, D.S. Manturov, V.N. Varavka, I.V. Kolesnikov, and E.S. Novikov.
[Wear Mechanisms and Methods of Controlling the Wear Resistance of TiN/AlN Nanocomposite Coatings for Tribological Purpose].
Trenie i Iznos.

2025, vol. 46, no. 3, pp. 211—222 (in Russian).

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-3-211-222

Wear Mechanisms and Methods of Controlling the Wear Resistance of TiN/AlN Nanocomposite Coatings for Tribological Purpose

V.I. Kolesnikov¹, O.V. Kudryakov², D.S. Manturov¹, V.N. Varavka², I.V. Kolesnikov¹, and E.S. Novikov¹

¹Rostov State Transport University (RSTU),
Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., 2, Rostov-on-Don 344038, Russia

²Don State Technical University (DSTU),
Gagarin square, 1, Rostov-on-Don 344000, Russia

Received 25.05.2025.

Abstract

The aim of this work was to analyze the wear resistance of composite ion-plasma coatings and substantiate methodological approaches for its prediction. The object of the study was multilayer 2D-nanocomposite coatings of the TiN/AlN system with a total thickness of 0.8—4.0 μm . The coatings were applied using vacuum ion-plasma technology onto a substrate made of 40CrNiMo structural steel with a sorbite structure and a hardness of HRC 28—30. Within each nitride layer, the composition of the components was close to equiatomic, and for the coating as a whole it was Ti:Al:N = 1:1:2 (at. %). The structure of the coatings, the morphology of the friction tracks and the wear mechanisms were studied using high-resolution scanning electron microscopy. The mechanical characteristics of the coatings (hardness H and elastic modulus E) were determined using standard continuous indentation techniques. The tribological characteristics (friction coefficient μ and volume wear J) were determined using the ball-on-disk sliding friction test with a circular trajectory of the indenter ball. The analysis of the obtained experimental data made it possible to construct a dependence of the coating hardness on their elemental composition and showed that the mechanical characteristics and wear resistance of the coatings sprayed at a lower temperature of 300—350 $^{\circ}\text{C}$ are consistently higher than those sprayed at 400—450 $^{\circ}\text{C}$. In addition, it was found that the highest wear values J were observed for the coatings with the smallest thickness. In order to analyze the effect of the coating thickness δ on their wear resistance, a computational and analytical model for predicting coating wear during tribological tests was used. On its basis, diagrams of critical states of ion-plasma composite TiN/AlN coatings were constructed, which made it possible to calculate the critical value of the coating thickness $\delta_{\min}$, at which the mechanism of coating wear during friction changes. With a relatively thin coating ($\delta < \delta_{\min}$), located on a “softer” (plastic) substrate, during tribotesting, accelerated wear of the coating occurs by the abrasive-mechanical mechanism due to the deflection of the coating and its subsequent cracking, peeling and chipping. With a relatively thick coating ($\delta \geq \delta_{\min}$), wear occurs by the abrasion mechanism, which, with high hardness of the coating, is characterized by its significant wear resistance and significantly extends the service life.

Keywords: vacuum ion-plasma technology, nanocomposite coatings, mechanical properties of coatings, tribological properties, modeling, critical states, wear mechanisms, wear resistance criterion.

DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-3-211-222

Адрес для переписки:

О.В. Кудряков
Донской государственный технический университет,
пл. Гагарина, 1, г. Ростов-на-Дону 344003, Россия
e-mail: kudryakov@mail.ru

Для цитирования:

В.И. Колесников, О.В. Кудряков, Д.С. Мантуров, В.Н. Варавка,
И.В. Колесников, Е.С. Новиков.
Механизмы износа и методы регулирования износостойкости
нанокомпозиционных покрытий TiN/AlN трибологического назначения.
Трение и износ.
2025. — Т. 46, № 3. — С. 211—222.
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-3-211-222

Address for correspondence:

O.V. Kudryakov
Don State Technical University (DSTU),
Gagarin square, 1, Rostov-on-Don 344000, Russia
e-mail: kudryakov@mail.ru

For citation:

V.I. Kolesnikov, O.V. Kudryakov, D.S. Manturov, V.N. Varavka,
I.V. Kolesnikov, and E.S. Novikov.
[Wear Mechanisms and Methods of Controlling the Wear Resistance of
TiN/AlN Nanocomposite Coatings for Tribological Purpose].
Trenie i Iznos.
2025, vol. 46, no. 3, pp. 211—222 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2025-46-3-211-222

Список использованных источников

1. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. Физические основы и инженерные приложения трибологии. — М.: Физматлит. — 2007
2. Белый А.В., Карпенко Г.Д., Мышкин Н.К. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев. — М.: Машиностроение. — 1991
3. **Surface Engineering for Enhanced Performance against Wear** / M. Roy (ed.). — Wien: Springer-Verlag. — 2013. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-0101-8_2
4. Наноструктурные покрытия / под ред. А. Кавалейро, Д. де Хоссона. — М.: Техносфера. — 2011
5. Колесников В.И., Кудряков О.В., Воропаев А.И., Колесников И.В., Варавка В.Н., Лифарь М.С., Гуда А.А., Мантуров Д.С., Новиков Е.С. Особенности формирования и прогнозирования триботехнических свойств ионно-плазменных алмазоподобных покрытий при стабилизации азотом // Трение и износ. — 2024 (45), № 1, 16—28. DOI: 10.32864/0202-4977-2024-45-1-16-28
6. Ильин А.А., Плихунов В.В., Петров Л.М., Спектор В.С. Вакуумная ионно-плазменная обработка. — М.: Альфа-М:ИНФРА-М. — 2023
7. Погребняк А.Д., Комаров Ф.Ф., Береснев В.М., Константинов С.В., Салищев Г.А. Многокомпонентные и высокоэнтропийные сплавы и нитридные покрытия на их основе. — М.: ЛЕНАНД. — 2021
8. Криштал М.М., Ясников И.С., Полунин В.И., Филатов А.М., Ульянов А.Г. Сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный микроанализ в примерах практического применения / под ред. М.М. Криштала. — М.: Техносфера. — 2009
9. Головин Ю.И. Наноиндентирование и его возможности. — М.: Машиностроение. — 2009
10. ГОСТ 8.748-2011 (ISO 14577-1:2002). Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. Часть 1: Метод испытаний.
11. ГОСТ Р 50779.25-2005 (ISO 3494:1976). Статистические методы. Статистическое представление данных. Мощность тестов для средних и дисперсий.
12. ГОСТ Р ISO 16269-4-2017. Статистические методы. Статистическое представление данных. Часть 4: Выявление и обработка выбросов.
13. Кудряков О.В., Колесников В.И., Ковалева И.Н., Колесников И.В., Мантуров Д.С. Расчетно-аналитическое прогнозирование износа покрытий при трибологических испытаниях на основе моделей контактно-усталостного разрушения // Трение и износ. — 2024 (45), № 3, 262—274. DOI: 10.32864/0202-4977-2024-45-3-262-274
14. Колесников Ю.В., Морозов Е.М. Механика

контактного разрушения. — М.: Издательство ЛКИ. — 2007

References

1. Myshkin N.K., Petrokovets M.I. Trenie, smazka, iznos. Fizicheskie osnovy i inzhenerny'e prilozheniya tribologii. — M.: Fizmatlit. — 2007 (in Russian)
2. Belyi A.V., Karpenko G.D., Myshkin N.K. Struktura i metody formirovaniya iznosostoykikh poverkhnostnykh sloyev. — M.: Mashinostroyeniye. — 1991 (in Russian)
3. **Surface Engineering for Enhanced Performance against Wear** / M. Roy (ed.). — Wien: Springer-Verlag. — 2013. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-0101-8_2
4. Cavaleiro A. and De Hosson J.T. Nanostructure Coatings. — New York: Springer Science+Business Media, LLC. — 2006
5. Kolesnikov V.I., Kudryakov O.V., Voropaev A.I., Kolesnikov I.V., Varavka V.N., Lifar M.S., Guda A.A., Manturov D.S., and Novikov E.S. Formation and Prediction of Tribotechnical Properties of Ion-Plasma Diamond-Like Coatings under Stabilization with Nitrogen // Journal of Friction and Wear. — 2024 (45), no. 1, 9—17. DOI: 10.3103/S1068366624700028
6. Il'in A.A., Plixunov V.V., Petrov L.M., Spektor V.S. Vakuumnaya ionno-plazmennaya obrabotka. — M.: Al'fa-M:INFRA-M. — 2023 (in Russian)
7. Pogrebnyak A.D., Komarov F.F., Beresnev V.M., Konstantinov S.V., Salishhev G.A. Mnogokomponentny'e i vy'sokoe'ntropijny'e splavy i nitridny'e pokry'tiya na ix osnove. — M.: LENAND. — 2021 (in Russian)
8. Krishtal M.M., Yasnikov I.S., Polunin V.I., Filatov A.M., Ul'yanenkov A.G. Skaniruyushhaya elektronnaya mikroskopiya i rentgenospektral'ny'j mikroanaliz v primerax prakticheskogo primeneniya / Pod red. M.M. Krishtala. — M.: Texnosfera. — 2009 (in Russian)
9. Golovin Yu.I. Nanoindentirovanie i ego vozmozhnosti. — M.: Mashinostroyeniye. — 2009 (in Russian)
10. GOST 8.748-2011 (ISO 14577-1:2002). Metally i splavy. Izmerenie tverdosti i drugix xarakteristik materialov pri instrumental'nom indentirovanii. Chast' 1: Metod ispy'tanij. (in Russian)
11. GOST R 50779.25-2005 (ISO 3494:1976). Statisticheskie metody. Statisticheskoe predstavlenie danny'x. Moshhnost' testov dlya srednix i dispersij. (in Russian)
12. GOST R ISO 16269-4-2017. Statisticheskie metody. Statisticheskoe predstavlenie danny'h. Chast' 4: Vy'yavlenie i obrabotka vy'brosov. (in Russian)
13. Kudryakov O.V., Kolesnikov V.I., Kavaliova I.N., Kolesnikov I.V., and Manturov D.S. Calculation and Analytical Prediction of Coating Wear During Tribological Tests Based on Models of Contact Fatigue Failure. Part 2 // Journal of Friction

and Wear. — 2024 (45), no. 3, 179—187. DOI:
10.3103/S1068366624700272

kontaktnogo razrusheniya. — M.: Izdatel'stvo LKI.
— 2007 (in Russian)

14. **Kolesnikov Yu.V., Morozov E.M.** Механика

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