

УДК 621.793.1(620.18+536.2)

## Стратегии улучшения триботехнических характеристик покрытий TiN/a-C

О.А. Беляк<sup>1,2</sup>, В.И. Колесников<sup>1</sup>, Д.В. Максимов<sup>1</sup>, Е.Д. Аникина<sup>1,2</sup>, М.М. Четверик<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),  
пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2, г. Ростов-на-Дону 344038, Россия

<sup>2</sup>Южный научный центр Российской академии наук (ЮНЦ РАН),  
пр. Чехова, 41, г. Ростов-на-Дону 344006, Россия

Поступила в редакцию 28.10.2025.

В настоящей работе исследованы механические свойства и триботехнические характеристики покрытий TiN (монослой), TiN/a-C (двухслойное, два типа сочетаний упругопластических свойств сред) на основе экспериментальных и теоретических подходов. Микроструктура синтезированных покрытий, рельеф лицевой поверхности аттестованы сканирующим электронным микроскопом. Анализ соответствия покрытия a-C осуществлялся методом нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) при использовании ИК Фурье-спектрометра. Твёрдость и приведённый модуль упругости были получены методом непрерывного индентирования пирамидой Берковича. Интенсивность износа и коэффициент трения определены в режиме трение скольжения. Результаты комплексного экспериментального исследования покрытий являлись основой для построения конечно-элементной модели индентирования двухслойной упругопластической среды с различным сочетанием упругих и пластических характеристик, и относительных толщин слоёв. Экспериментально установлена корреляция параметров рассматриваемых покрытий  $H/E$  и  $H^3/E^2$  и интенсивности износа. Теоретически установлены функциональные зависимости твёрдости и приведённого модуля упругости в зависимости от относительной толщины лицевого метастабильного слоя a-C. Определено оптимальное соотношение толщин составляющих слоёв TiN/a-C покрытия при заданных упругопластических характеристиках материалов, которое будет обладать наилучшими триботехническими характеристиками.

**Ключевые слова:** многослойные покрытия TiN/a-C, индентирование упругопластических сред, механические свойства TiN, a-C, триботехнические характеристики a-C.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2025-46-5-415-424

---

**Адрес для переписки:**

О.А. Беляк  
Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),  
пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2,  
г. Ростов-на-Дону 344038, Россия;  
Южный научный центр Российской академии наук (ЮНЦ РАН),  
пр. Чехова, 41, г. Ростов-на-Дону 344006, Россия  
e-mail: belyak.o.a@gmail.com

---

**Address for correspondence:**

O.A. Belyak  
Rostov State Transport University,  
Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., 2,  
Rostov-on-Don 344038, Russia;  
Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences (SSC RAS),  
Chekhov Ave., 41, Rostov-on-Don 344006, Russia  
e-mail: belyak.o.a@gmail.com

---

**Для цитирования:**

О.А. Беляк, В.И. Колесников, Д.В. Максимов, Е.Д. Аникина,  
М.М. Четверик.  
Стратегии улучшения триботехнических характеристик покрытий  
TiN/a-C.  
Трение и износ.  
2025. – Т. 46, № 5. – С. 415–424.  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2025-46-5-415-424

---

**For citation:**

O.A. Belyak, V.I. Kolesnikov, D.V. Maksimov, E.D. Anikina, and  
M.M. Chetverik  
[Strategies for Improving the Tribological Characteristics of TiN/a-C  
Coatings].  
Trenie i Iznos.  
2025, vol. 46, no. 5, pp. 415–424 (in Russian).  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2025-46-5-415-424

# Strategies for Improving the Tribological Characteristics of TiN/a-C Coatings

O.A. Belyak<sup>1,2</sup>, V.I. Kolesnikov<sup>1</sup>, D.V. Maksimov<sup>1</sup>, E.D. Anikina<sup>1,2</sup>, and M.M. Chetverik<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Rostov State Transport University,  
Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., 2, Rostov-on-Don 344038, Russia

<sup>2</sup>Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences (SSC RAS),  
Chekhov Ave., 41, Rostov-on-Don 344006, Russia

Received 28.10.2025.

## Abstract

This work investigates the mechanical properties and tribological characteristics of TiN (single layer) and TiN/a-C (double layer, two types of combinations of elastic-plastic properties of media) coatings based on experimental and theoretical approaches. The microstructure of the synthesized coatings and the relief of the front surface were examined using a scanning electron microscope. The analysis of the conformity of the a-C coating was performed using the disturbed total internal reflection method with an IR Fourier spectrometer. The hardness and reduced elastic modulus of the samples were determined through continuous indentation using a Berkovich pyramid. The intensity of wear and the friction coefficient were determined in a sliding friction mode. The findings of a thorough experimental investigation into the coatings were instrumental in formulating a finite element model of indentation into a two-layer elastic-plastic medium, incorporating varied combinations of elastic and plastic characteristics, as well as distinct relative layer thicknesses. The correlation between the parameters of the considered coatings  $H/E$  and  $H^3/E^2$  and the wear intensity was established through experimental means. Theoretically, the functional dependencies of hardness and reduced elastic modulus on the relative thickness of the face metastable layer a-C were established. The optimal thickness ratio of the TiN/a-C coating layers has been determined for given elastic-plastic characteristics of the materials. Such a coating will exhibit optimal tribological characteristics.

**Keywords:** multilayer TiN/a-C coatings, indentation of elastic-plastic media, mechanical properties TiN, a-C, tribological characteristics a-C.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2025-46-5-415-424

---

### Адрес для переписки:

О.А. Беляк  
Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),  
пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2, г.  
Ростов-на-Дону 344038, Россия;  
Южный научный центр Российской академии наук (ЮНЦ РАН),  
пр. Чехова, 41, г. Ростов-на-Дону 344006, Россия  
e-mail: belyak.o.a@gmail.com

### Для цитирования:

О.А. Беляк, В.И. Колесников, Д.В. Максимов, Е.Д. Анкина,  
М.М. Четверик.  
Стратегии улучшения триботехнических характеристик покрытий  
TiN/a-C.  
Трение и износ.  
2025. – Т. 46, № 5. – С. 415–424.  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2025-46-5-415-424

---

### Address for correspondence:

O.A. Belyak  
Rostov State Transport University,  
Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., 2,  
Rostov-on-Don 344038, Russia;  
Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences (SSC RAS),  
Chekhov Ave., 41, Rostov-on-Don 344006, Russia  
e-mail: belyak.o.a@gmail.com

### For citation:

O.A. Belyak, V.I. Kolesnikov, D.V. Maksimov, E.D. Anikina, and  
M.M. Chetverik.  
[Strategies for Improving the Tribological Characteristics of TiN/a-C  
Coatings].  
*Trenie i Iznos*.  
2025, vol. 46, no. 5, pp. 415–424 (in Russian).  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2025-46-5-415-424

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Aghaei A.A., Eshaghi A., and Karami E.** Silicon Solar Cell Performance Deposited by Diamond Like Carbon Thin Film “Atomic Oxygen Effects” // *Acta Astronautica*. — 2017 (138), 369—373
2. **Pavlenko V.I., Cherkashina N.I., and Zaitsev S.V.** Fabrication and Characterization of Nanocomposite Films Al, Cu/Al and Cr/Al Formed on Polyimide Substrate // *Acta Astronautica*. — 2019 (160), 489—498
3. **Santos M.D., Fukumasu N.K., Tschiptschin A.P., Lima N.B., Figueroa C.A., Weber J.S., Souza R.M., and Machado I.F.** Effect of Ti/Si and Ti/TiN/Si Interlayers on the Structure, Properties, and Tribological Behavior of an a-C Film Deposited onto a C17200 Copper-Beryllium Alloy // *Surface and Coatings Technology*. — 2022 (441), 128561
4. **Liu L., Wu Z., An X., Xiao S., Cui S., Lin H., Fu R.K.Y., Tian X., Wei R., Chu P.K., and Pan F.** Excellent Adhered Thick Diamond-Like Carbon Coatings by Optimizing Hetero-Interfaces with Sequential Highly Energetic Cr and C Ion Treatment // *Journal of Alloys and Compounds*. — 2018 (735), 155—162
5. **Song Z., Liu Y., Liu Yu., Jiang X., Pilipstou D.G., and Rogachev A.V.** Improving the Protective Properties of an Artificial Joint Friction Couple by Using TiN and DLC Films // *Surface and Coatings Technology*. — 2023 (472), 129944
6. **Chen X., Du Y., and Chung Y.-W.** Commentary on Using H/E and H<sub>3</sub>/E<sub>2</sub> as Proxies for Fracture Toughness of Hard Coatings // *Thin Solid Films*. — 2019 (688), 137265
7. **Lepicka M., Grądzka-Dahlke M., Pieniak D., Pasierbiewicz K., and Niewczas A.** Tribological Performance of Titanium Nitride Coatings: A Comparative Study on TiN-Coated Stainless Steel and Titanium Alloy // *Wear*. — 2019 (422-423), 68—80
8. **Беляк О.А., Суворова Т.В., Мантуров Д.С.** Исследование триботехнических и механических характеристик износостойких покрытий с учетом их упругопластических свойств // *Трение и износ*. — 2024 (45), № 5, 410—419
9. **Колесников В.И., Кудряков 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
10. **Пашков Д.М., Беляк О.А., Гуда А.А., Колесников В.И.,** Обратное проектирование механических и трибологических свойств покрытий: результаты алгоритмов машинного обучения // *Физическая мезомеханика*. — 2022, № 2(25), 24—34
11. **McMaster S.J., Kosarieh S., Liskiewicz T.W., Neville A., and Beake B.D.** Utilising H/E to Predict Fretting Wear Performance of DLC Coating Systems // *Tribology International*. — 2023 (185), 108524
12. **Robertson J.** Diamond-Like Amorphous Carbon // *Materials Science and Engineering: R: Reports*. — 2002 (37), 129—281
13. **Konshina E.A. and Vangonen A.I.** Features of the Vibrational Spectra of Diamond-Like and Polymer-Like a-C:H Films // *Semiconductors*. — 2005 (39), 585—590
14. **Ватульян А. О., Беляк О. А.** Асимптотический подход к расчету волновых полей в слое с дефектом малого характерного размера // *Акустический журнал*. — 2020, № 3 (66), 235—241
15. **Беляк О.А., Суворова Т.В.** Влияние микроструктуры основания на силы трения при движении плоского штампа // *Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества*. — 2018 (3), 25—31

## References

1. **Aghaei A.A., Eshaghi A., and Karami E.** Silicon Solar Cell Performance Deposited by Diamond Like Carbon Thin Film “Atomic Oxygen Effects” // *Acta Astronautica*. — 2017 (138), 369—373
2. **Pavlenko V.I., Cherkashina N.I., and Zaitsev S.V.** Fabrication and Characterization of Nanocomposite Films Al, Cu/Al and Cr/Al Formed on Polyimide Substrate // *Acta Astronautica*. — 2019 (160), 489—498
3. **Santos M.D., Fukumasu N.K., Tschiptschin A.P., Lima N.B., Figueroa C.A., Weber J.S., Souza R.M., and Machado I.F.** Effect of Ti/Si and Ti/TiN/Si Interlayers on the Structure, Properties, and Tribological Behavior of an a-C Film Deposited onto a C17200 Copper-Beryllium Alloy // *Surface and Coatings Technology*. — 2022 (441), 128561
4. **Liu L., Wu Z., An X., Xiao S., Cui S., Lin H., Fu R.K.Y., Tian X., Wei R., Chu P.K., and Pan F.** Excellent Adhered Thick Diamond-Like Carbon Coatings by Optimizing Hetero-Interfaces with Sequential Highly Energetic Cr and C Ion Treatment // *Journal of Alloys and Compounds*. — 2018 (735), 155—162
5. **Song Z., Liu Y., Liu Yu., Jiang X., Pilipstou D.G., and Rogachev A.V.** Improving the Protective Properties of an Artificial Joint Friction Couple by Using TiN and DLC Films // *Surface and Coatings Technology*. — 2023 (472), 129944
6. **Chen X., Du Y., and Chung Y.-W.** Commentary on Using H/E and H<sub>3</sub>/E<sub>2</sub> as Proxies for Fracture Toughness of Hard Coatings // *Thin Solid Films*. — 2019 (688), 137265
7. **Lepicka M., Grądzka-Dahlke M., Pieniak D., Pasierbiewicz K., and Niewczas A.** Tribological Performance of Titanium Nitride Coatings: A Comparative Study on TiN-Coated Stainless Steel and Titanium Alloy // *Wear*. — 2019 (422-423), 68—80
8. **Belyak O.A., Suvorova T.V., and Manturov D.S.** Study of Tribological and Mechanical Characteristics of Wear-Resistant Coatings Taking into Account Their Elastoplastic Properties // *Journal of Friction and Wear*. — 2025 (45), no. 5, 280—286
9. **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 the Properties of Ion-Plasma Diamond-Like Coatings under Nitrogen Stabilization // Journal of Friction and Wear. — 2024 (45), no. 1, 9—17
10. **Pashkov D.M., Belyak O.A., Guda A.A., and Kolesnikov V.I.** Reverse Engineering of Mechanical and Tribological Properties of Coatings: Results of Machine Learning Algorithms // Physical Mesomechanics. — 2022, no. 4 (25), 296—305
11. **McMaster S.J., Kosarieh S., Liskiewicz T.W., Neville A., and Beake B.D.** Utilising H/E to Predict Fretting Wear Performance of DLC Coating Systems // Tribology International. — 2023 (185), 108524
12. **Robertson J.** Diamond-Like Amorphous Carbon // Materials Science and Engineering: R: Reports. — 2002 (37), 129—281
13. **Konshina E.A. and Vangonen A.I.** Features of the Vibrational Spectra of Diamond-Like and Polymer-Like a-C:H Films // Semiconductors. — 2005 (39), 585—590
14. **Vatulyan A.O. and Belyak O.A.** An Asymptotic Approach to the Calculation of Wave Fields in a Layer with a Defect with a Small Characteristic Size // Acoustical Physics. — 2020 (66), 213—219
15. **Belyak O.A., Suvorova T.V.** The effect of the microstructure of the base on the friction forces during the movement of a flat punch // Ekologicheskii Vestnik Nauchnykh Tsentrov Chernomorskogo Ekonomicheskogo Sotrudnichestva. — 2018, № 3(15), 25—31 (in Russian)

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](mailto:FWJ@tut.by)