

УДК 621.793.1(620.18+536.2)

## Исследование триботехнических и механических характеристик износостойких покрытий с учетом их упругопластических свойств

О.А. Беляк<sup>1,2</sup>, Т.В. Суворова<sup>1</sup>, Д.С. Мантуров<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 07.06.2024.

После доработки 10.10.2024.

Принята к публикации 14.10.2024.

Исследовано влияние упругопластических свойств системы «покрытие — подложка» на механические и триботехнические характеристики покрытий, получаемые в рамках индентирования и трибоиспытаний. Проведён скрининг-эксперимент для вакуумных ионно-плазменных покрытий нитридных систем TiAlN, CrAlSiN, нанесенных на стальные подложки (38X2MЮА, 12X2Н4А). Механические свойства покрытий были получены с помощью комплекса «NanoTest 600» методом непрерывного индентирования. Исследование микроструктуры покрытий и рельефа их поверхности с высоким разрешением выполнено двулучевым (электронный/ионный) сканирующим электронным микроскопом ZEISS CrossBeam 340 (SEM). Триботехнические испытания нитридных покрытий проводились на машине трения TRB (Anton Paar Tritec) в соответствии с методиками DIN 50324 и ASTM G99. Процесс индентирования нитридных покрытий был изучен на основе решения квазистатической контактной задачи о внедрении жёсткого индентора в упругопластическое двухслойное полупространство. Были определены механические характеристики рассматриваемых покрытий  $H/E$  и  $H^3/E^2$ , условия нарушения адгезии между слоями. Результаты теоретических исследований сопоставлены с результатами лабораторных экспериментов. Установлено, что эксплуатационный ресурс элементов трибосопряжения с покрытиями заданной толщины можно увеличить путём сочетания упругопластических свойств слоистой среды, адаптированных под заданные режимы нагружения, что позволит предотвратить локализацию растягивающих и сжимающих напряжений, отслаивание и трещинообразование на границе раздела двух материалов.

**Ключевые слова:** индентирование упругопластических сред, трибологические свойства нитридных покрытий, контактная задача.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-5-410-419

**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  
e-mail: belyak.o.a@gmail.com

**Для цитирования:**

О.А. Беляк, Т.В. Суворова, Д.С. Мантуров.  
Исследование триботехнических и механических характеристик износостойких покрытий с учетом их упругопластических свойств. Трение и износ. 2024. — Т. 45, № 5. — С. 410—419.  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-5-410-419

**Address for correspondence:**

O.A. Belyak  
Rostov State Transport University (RSTU),  
Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., 2,  
Rostov-on-Don 344038, Russia  
e-mail: belyak.o.a@gmail.com

**For citation:**

O.A. Belyak, T.V. Suvorova, and D.S. Manturov.  
[Study of Tribotechnical and Mechanical Characteristics of Wear-Resistant Coatings Taking into Account Their Elastoplastic Properties].  
*Trenie i Iznos*. 2024, vol. 45, no. 5, pp. 410—419 (in Russian).  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-5-410-419

# Study of Tribological and Mechanical Characteristics of Wear-Resistant Coatings Taking into Account Their Elastoplastic Properties

O.A. Belyak<sup>1,2</sup>, T.V. Suvorova<sup>1</sup>, and D.S. Manturov<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences,  
Chekhov Ave., 41, Rostov-on-Don 344006, Russia

Received 07.06.2024.

Revised 10.10.2024.

Accepted 14.10.2024.

## Abstract

The influence of the elastic-plastic properties of the coating-substrate system on the mechanical and tribological properties of coatings is investigated in the present work. The mechanical and tribological properties of the coatings were obtained by tribological testing and indentation. A screening experiment for vacuum ion plasma coatings of nitride systems TiAlN, CrAlSiN deposited on steel substrates (38X2MYA, 12X2H4A) was performed. The mechanical properties of the coatings were determined using the NanoTest 600 continuous indentation method. The microstructure of the coatings and their surface topography were studied using a high-resolution ZEISS CrossBeam 340 scanning electron microscope (SEM). Tribological tests of the nitride coatings were performed on a TRB friction machine (Anton Paar Tritec) according to the methods of DIN 50324 and ASTM G99. In addition, the indentation process of nitride coatings was studied based on the solution of the quasi-static contact problem when introducing a rigid indenter into an elastoplastic two-layer half-space. The mechanical characteristics of the considered coatings  $H/E$  and  $H^3/E^2$ , the conditions of adhesion failure between the layers have been determined. Theoretical studies are complexed with the results of laboratory experiments. It is shown that when setting up laboratory experiments on indentation and tribological tests of coatings it is necessary to control not only the permissible depth of penetration of the indenter, but also the ratios of elastic-plastic properties of the coating and the substrate. It has been found that the service life of tribo-conjugate elements with coatings of a certain thickness can be increased by combining the elastic-plastic properties of the layered medium adapted to the given loading modes. This will prevent the localization of tensile and compressive stresses, delamination and cracking at the interface of two materials.

**Keywords:** indentation of elastoplastic media, tribological properties of nitride coatings, contacting problem.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-5-410-419

---

### 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  
e-mail: belyak.o.a@gmail.com

### Для цитирования:

О.А. Беляк, Т.В. Суворова, Д.С. Мантуров.  
Исследование трибологических и механических характеристик износостойких покрытий с учетом их упругопластических свойств. Трение и износ. 2024. — Т. 45, № 5. — С. 410—419.  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-5-410-419

---

### Address for correspondence:

O.A. Belyak  
Rostov State Transport University (RSTU),  
Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., 2,  
Rostov-on-Don 344038, Russia  
e-mail: belyak.o.a@gmail.com

### For citation:

O.A. Belyak, T.V. Suvorova, and D.S. Manturov.  
[Study of Tribological and Mechanical Characteristics of Wear-Resistant Coatings Taking into Account Their Elastoplastic Properties].  
*Trenie i Iznos*. 2024, vol. 45, no. 5, pp. 410—419 (in Russian).  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-5-410-419

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Kolesnikov V.I., Pashkov D.M., Belyak O.A., Guda A.A., Danilchenko S.A., Manturov D.S., Novikov E.S., Kudryakov O.V., Guda S.A., Soldatov A.V., and Kolesnikov I.V.** Design of Double Layer Protective Coatings: Finite Element Modeling and Machine Learning Approximations // *Acta Astronautica*. — 2023 (204), 869—877
2. **Мантуров Д.С., Колесников И.В., Кудряков О.В., Колесников В.И., Иваночкин П.Г., Данильченко С.А.** Влияние базовых технологических факторов получения вакуумных ионно-плазменных покрытий TiN на их механические и трибологические характеристики // *Трение и износ*. — 2023 (44), № 4, 310—321
3. **Колесников В.И., Кудряков О.В., Забияка И.Ю., Новиков Е.С., Мантуров Д.С.** Структурные аспекты износостойкости вакуумных ионно-плазменных покрытий // *Физическая мезомеханика*. — 2020 (23), № 1, 62—77
4. **Левашов Е.А., Штанский Д.В., Кирюханцев-Корнеев Ф.В., Петржик М.И., Тюрина М.Я., Швейко А.Н.** Многофункциональные наноструктурные покрытия: получение, структура и обеспечение единства измерений механических и трибологических свойств // *Деформация и разрушение материалов*. — 2009, № 11, 19—36
5. **Торская Е.В.** Модели фрикционного взаимодействия тел с покрытиями. — Москва-Ижевск: Ин-т компьютерных исследований. — 2020
6. **Шугуров А.Р., Кузьминов Е.Д., Панин С.В.** Применение методов анализа оптических изображений поверхностей трения на основе Ti-Al-N для оценки накопления повреждений и диагностики разрушения при трибологических испытаниях // *Дефектоскопия*. — 2020, № 8, 22—34
7. **Leyland A. and Matthews A.** On the Significance of the H/E Ratio in Wear Control: a Nanocomposite Coating Approach to Optimised Tribological Behavior // *Wear*. — 2000 (246), 1—11
8. **Ковалева И.Н., Григорьев А.Я., Губенко М.М., Столярова О.О.** Механизмы трения бикомпонентных покрытий из термодинамически несовместимых металлов, конденсированных из паров на криогенные поверхности // *Трение и износ*. — 2016 (37), № 3, 379—382
9. **Liskiewicz T., Fouvry S., and Wendler B.** Hard Coatings Durability under Fretting Wear // *Tribology and Interface Engineering Series*. — 2005 (48), 657—665
10. **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
11. **Musil J. and Jirout M.** Toughness of Hard Nanostructured Ceramic Thin Films // *Surface and Coatings Technology*. — 2007, nos. 9–11(201), 5148—5152

12. **Łępicka 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
13. **Sneddon I.N.** The Relation Between Load and Penetration in the Axisymmetric Boussinesq Problem for a Punch Arbitrary Profile // *International Journal of Engineering Science*. — 1965, no. 1(3), 47—57
14. **Thurn J. and Cook R.F.** Simplified Area Function for Sharp Indenter Tips in Depthsensing Indentation // *Journal of Materials Research*. — 2002 (17), 1143—1146
15. **Tabor D.** *The Hardness of Metals*. — Oxford: Clarendon Press. — 1951

## References

1. **Kolesnikov V.I., Pashkov D.M., Belyak O.A., Guda A.A., Danilchenko S.A., Manturov D.S., Novikov E.S., Kudryakov O.V., Guda S.A., Soldatov A.V., and Kolesnikov I.V.** Design of Double Layer Protective Coatings: Finite Element Modeling and Machine Learning Approximations // *Acta Astronautica*. — 2023 (204), 869—877
2. **Manturov D.S., Kolesnikov I.V., Kudryakov O.V., Kolesnikov V.I., Ivanochkin P.G., Danilchenko S.A.** Influence of the Principal Technological Factors of Producing Vacuum Ion-Plasma TiN Coatings on Their Mechanical and Tribological Properties // *Friction and Wear*. — 2023 (44), no. 4, 310—321
3. **Kolesnikov V.I., Kudryakov O.V., Zabiya I.Y., Novikov E.S., Manturov D.S.** Structural Aspects of Wear Resistance of Coatings Deposited by Physical Vapor Deposition // *Physical Mesomechanics*. — 2020 (23), 570—583
4. **Levashov E.A., Shtansky D.V., Kiryukhantsev-Korneev Ph., Petrzhik M., Tyurina, M.Ya., and Sheveiko A.N.** Multifunctional Nanostructured Coatings: Formation, Structure, and the Uniformity of Measuring Their Mechanical and Tribological Properties // *Russian Metallurgy*. — 2010, 917—935
5. **Torskaya E.V.** Modeli frikcionnogo vzaimodejstviya tel s pokrytiami [Models of frictional interaction of bodies with coatings]. — Moskva-Izhevsk: In-t komp'yuternyh issledovaniy. — 2020 (in Russian)
6. **Shugurov A.R., Kuzminov E.D., and Panin S.V.** Using Methods of Analysis of Optical Images of Friction Surfaces of Ti–Al–N Based Coatings for Assessing Accumulation of Damage and Diagnostics of Failure in Tribological Tests // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. — 2020, no. 8(56), 635—646
7. **Leyland A. and Matthews A.** On the Significance of the H/E Ratio in Wear Control: a Nanocomposite

- Coating Approach to Optimised Tribological Behavior // *Wear*. — 2000 (**246**), 1—11
8. **Kavaliova I.N., Grigoriev A.Ya., Gubenko M.M., and Stolyarova O.O.** Mechanisms of Friction of Bi-component Coatings of Thermodynamically Incompatible Metals Produced Using Vapor Condensation on Cryogenic Surfaces // *Journal of Friction and Wear*. — 2016 (**37**), no. 3, 297—300. DOI: 10.3103/S1068366616030090
  9. **Liskiewicz T., Fouvry S., and Wendler B.** Hard Coatings Durability under Fretting Wear // *Tribology and Interface Engineering Series*. — 2005 (**48**), 657—665
  10. **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.
  11. **Musil J. and Jirout M.** Toughness of Hard Nanostructured Ceramic Thin Films // *Surface and Coatings Technology*. — 2007, № 9—11(201), 5148—5152
  12. **Łępicka 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
  13. **Sneddon I.N.** The Relation Between Load and Penetration in the Axisymmetric Boussinesq Problem for a Punch Arbitrary Profile // *International Journal of Engineering Science*. — 1965, no. 1(3), 47—57
  14. **Thurn J. and Cook R.F.** Simplified Area Function for Sharp Indenter Tips in Depth-sensing Indentation // *Journal of Materials Research*. — 2002 (**17**), 1143—1146
  15. **Tabor D.** *The Hardness of Metals*. — Oxford: Clarendon Press. — 1951

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)