

УДК 621.793.1(620.18+620.178.162)

## Расчетно-аналитическое прогнозирование износа покрытий при трибологических испытаниях на основе моделей контактно-усталостного разрушения

О.В. Кудряков<sup>1,2</sup>, В.И. Колесников<sup>1</sup>, И.Н. Ковалева<sup>3</sup>, И.В. Колесников<sup>1</sup>, Д.С. Мантуров<sup>1</sup>

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

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

<sup>3</sup>Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси,  
ул. Кирова, 32а, г. Гомель 246050, Беларусь

Поступила в редакцию 13.03.2024.

После доработки 05.06.2024.

Принята к публикации 17.06.2024.

В работе рассмотрены условия трибологических испытаний стальных образцов с нитридными ионно-плазменными покрытиями. Предложена расчетно-аналитическая модель для количественной оценки параметров контакта и изнашивания при испытаниях на трение скольжения: размера контактной площадки, глубины контактного сближения, глубины пластической зоны, напряжений в покрытии, предела усталости, критической толщины покрытия, исключаяющей его прогиб. Показано, что покрытия, с толщиной выше критической, реализуют свой потенциал физико-механических и трибологических свойств независимо от подложки. При недостаточной толщине покрытия результат трибологических испытаний определяется поведением системы «покрытие—подложка» — высокотвердое нитридное покрытие на пластичной стальной подложке испытывает прогиб и преждевременное хрупкое разрушение. Для оценки износа покрытий в этом случае рекомендовано использование моделей усталостного разрушения с построением кривой усталости Велера и определением предела усталости на основе теории Мураками-Эндо. Реализация рекомендованного подхода выполнена для исследованных нитридных покрытий с использованием базы собственных экспериментальных данных.

**Ключевые слова:** ионно-плазменная технология, нитридные покрытия, физико-механические свойства, трибология, износостойкость, трение скольжения, механика контактного разрушения, усталость.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-3-262-274

**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:**

О.В. Кудряков, В.И. Колесников, И.Н. Ковалева, И.В. Колесников,  
Д.С. Мантуров.

Расчетно-аналитическое прогнозирование износа покрытий при  
трибологических испытаниях на основе моделей контактно-  
усталостного разрушения.

Трение и износ.

2024. – Т. 45, № 3. – С. 262–274.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-3-262-274

**Address for correspondence:**

O.V. Kudryakov  
Don State Technical University,  
Gagarin sq., 1, Rostov-on-Don 344003, Russia  
e-mail: kudryakov@mail.ru

**For citation:**

O.V. Kudryakov, V.I. Kolesnikov, I.N. Kavaliova, I.V. Kolesnikov, and  
D.S. Manturov.

[Calculation and Analytical Prediction of Coating Wear During  
Tribological Tests Based on Models of Contact Fatigue Failure].  
*Trenie i Iznos*.

2024, vol. 45, no. 3, pp. 262–274 (in Russian).

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-3-262-274

# Calculation and Analytical Prediction of Coating Wear During Tribological Tests Based on Models of Contact Fatigue Failure

O.V. Kudryakov<sup>1,2</sup>, V.I. Kolesnikov<sup>1</sup>, I.N. Kavaliova<sup>3</sup>, I.V. Kolesnikov<sup>1</sup>, and D.S. Manturov<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>Don State Technical University,  
Gagarin square, 1, Rostov-on-Don 344000, Russia

<sup>3</sup>V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus,  
Kirov st., 32a, Gomel 246050, Belarus

Received 13.03.2024.

Revised 05.06.2024.

Accepted 17.06.2024.

## Abstract

The work examines the conditions of tribological tests of steel samples with nitride ion-plasma coatings. A calculation and analytical model is proposed for quantitative assessment of contact and wear parameters during sliding friction tests: the size of the contact area, the depth of contact approach, the depth of the plastic zone, stresses in the coating, fatigue limit, and the critical thickness of the coating, which excludes its deflection. It has been shown that coatings with a thickness above critical realize their potential for physical, mechanical and tribological properties regardless of the substrate. If the coating thickness is insufficient, the result of tribological tests is determined by the behavior of the “coating-substrate” system — a high-hard nitride coating on a ductile steel substrate experiences deflection and premature brittle failure. To assess the wear of coatings in this case, it is recommended to use fatigue failure models with construction of the Wöhler fatigue curve and determination of the fatigue limit based on the Murokami-Endo theory. The implementation of the recommended approach was carried out for the studied nitride coatings using a database of our own experimental data.

**Keywords:** ion plasma technology, nitride coatings, physical and mechanical properties, tribology, wear resistance, sliding friction, contact fracture mechanics, fatigue.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-3-262-274

---

### 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:

О.В. Кудряков, В.И. Колесников, И.Н. Ковалева, И.В. Колесников, Д.С. Мантуров.

Расчетно-аналитическое прогнозирование износа покрытий при трибологических испытаниях на основе моделей контактно-усталостного разрушения.

Трение и износ.

2024. – Т. 45, № 3. – С. 262–274.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-3-262-274

---

### Address for correspondence:

O.V. Kudryakov  
Don State Technical University,  
Gagarin sq., 1, Rostov-on-Don 344003, Russia  
e-mail: kudryakov@mail.ru

### For citation:

O.V. Kudryakov, V.I. Kolesnikov, I.N. Kavaliova, I.V. Kolesnikov, and D.S. Manturov.

[Calculation and Analytical Prediction of Coating Wear During Tribological Tests Based on Models of Contact Fatigue Failure].

*Trenie i Izнос.*

2024, vol. 45, no. 3, pp. 262–274 (in Russian).

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-3-262-274

## Список использованных источников

1. **Мышкин Н.К., Петроковец М.И.** Трение, смазка, износ. Физические основы и инженерные приложения трибологии. — М.: Физматлит. — 2007
2. **Кудряков О.В., Колесников В.И., Мантуров Д.С., Колесников И.В., Варавка В.Н.** Инженерные соотношения для расчетно-аналитического прогнозирования износа покрытий при трибологических испытаниях // Трение и износ. — 2024 (45), № 2, 171—182. DOI: 10.32864/0202-4977-2024-45-2-171-182
3. **Kolesnikov V.I., Novikov E.S., Kudryakov O.V., and Varavka V.N.** The Degradation Mechanisms in Ion-Plasma Nanostructured Coatings under the Conditions of Contact Cyclic Loads // Journal of Physics: Conference Series. — 2019 (1281), 012036. DOI: 10.1088/1742-6596/1281/1/012036
4. **Kudryakov O.V., Varavka V.N., Zabiya I.Yu., Sidashov A.V., and Novikov E.S.** Synthesis, Electronic Structure, Microstructure, and Properties of Vacuum Ion-Plasma Coatings Based on Carbon // Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications. Springer Proceedings in Materials. — 2021 (10), 197—206. DOI: 10.1007/978-3-030-76481-4\_17
5. **Колесников В.И., Кудряков О.В., Варавка В.Н., Сидашов А.В., Колесников И.В., Мантуров Д.С., Воропаев А.И.** Особенности структурно-фазового состояния и свойства вакуумных ионно-плазменных покрытий системы Cr-Al-Si-N // Физическая мезомеханика. — 2022 (25), № 6, 26—38. DOI: 10.55652/1683-805X\_2022\_25\_6\_26
6. **Колесников Ю.В., Морозов Е.М.** Механика контактного разрушения. — М.: Изд-во ЛКИ. — 2007
7. **Тушинский Л.И., Плохов А.В., Токарев А.О., Синдеев В.И.** Методы исследования материалов: Структура, свойства и процессы нанесения неорганических покрытий. — М.: Мир. — 2004
8. **Головин Ю.И.** Наноиндентирование и механические свойства твердых тел в субмикрообъемах, тонких приповерхностных слоях и пленках // Физика твердого тела. — 2008 (50), № 12, 2113—2142
9. **Наноструктурные покрытия** / под ред. А. Кавалейро, Д. Де Хоссона. — М.: Техносфера. — 2011
10. **Ботвина Л.Р.** Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности. — М.: Наука. — 2008
11. **Эшби М., Джонс Д.** Конструкционные материалы. Полный курс. Учебное пособие. — пер. с англ. — Долгопрудный: Интеллект. — 2010
12. **Murakami Y. and Endo M.** Quantitative Evaluation of Fatigue Strength of Metals Containing Various Small Defects or Cracks // Engineering Fracture Mechanics. — 1983, no. 17, 1—15
13. **Murakami Y. and Endo M.** Effects of Defects, Inclusions and Inhomogeneities on Fatigue Strength // International Journal of Fatigue. — 1994, no. 16, 163—182
14. **Murakami Y.** Metal Fatigue: The Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions. — Oxford, UK: Elsevier. — 2002
15. **Åman M., Tanaka Y., Murakami Y., Remes H., and Marquis G.** Fatigue Strength Evaluation of Small Defect at Stress Concentration // Procedia Structural Integrity. — 2017, no. 7, 351—358. DOI: 10.1016/j.prostr.2017.11.099
16. **Золоторевский В.С.** Механические свойства металлов. — М.: МИСИС. — 1998

## References

1. **Myshkin N.K., Petrokovec M.I.** Trenie, smazka, iznos. Fizicheskie osnovy i inzhenernye prilozheniya tribologii. — М.: Fizmatlit. — 2007 (in Russian)
2. **Kudryakov O.V., Kolesnikov V.I., Manturov D.S., Kolesnikov I.V., and Varavka V.N.** Engineering Relationships for Computational and Analytical Prediction of Coating Wear During Tribological Tests // Journal of Friction and Wear. — 2024 (45), no. 2, 171—182. DOI: 10.32864/0202-4977-2024-45-2-171-182
3. **Kolesnikov V.I., Novikov E.S., Kudryakov O.V., and Varavka V.N.** The Degradation Mechanisms in Ion-Plasma Nanostructured Coatings under the Conditions of Contact Cyclic Loads // Journal of Physics: Conference Series. — 2019 (1281), 012036. DOI: 10.1088/1742-6596/1281/1/012036
4. **Kudryakov O.V., Varavka V.N., Zabiya I.Yu., Sidashov A.V., and Novikov E.S.** Synthesis, Electronic Structure, Microstructure, and Properties of Vacuum Ion-Plasma Coatings Based on Carbon // Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications. Springer Proceedings in Materials. — 2021 (10), 197—206. DOI: 10.1007/978-3-030-76481-4\_17
5. **Kolesnikov V.I., Kudryakov O.V., Varavka V.N., Sidashov A.V., Kolesnikov I.V., Manturov D. S., and Voropaev A.I.** Features of the Structural-Phase State and Properties of Vacuum Ion-Plasma Coatings of the Cr-Al-Si-N System // Physical Mesomechanics. — 2023 (26), no. 2, 126—136. DOI: 10.1134/S1029959923020029
6. **Kolesnikov Yu.V., Morozov Ye.M.** Mekhanika kontaktnogo razrusheniya. — М.: Izd-vo LKI. — 2007 (in Russian)
7. **Tushinskiy L.I., Plokhov A.V., Tokarev A.O., Sindeyev V.I.** Metody issledovaniya materialov: Struktura, svoystva i protsessy naneseniya neorganicheskikh pokrytiy. — М.: Mir. — 2004 (in Russian)
8. **Golovin Yu.I.** Nanostructure Nanoindentation and Mechanical Properties of Solids in Submicrovolumes, Thin Near-Surface Layers, and Films: a Review //

- Physics of the Solid State. — 2008 (**50**), no. 12, 2205—2236. DOI: 10.1134/S106378340812001
9. **Nanostructured Coatings** / A. Cavaleiro, J.T. de Hosson (Eds.). — New York: Springer Science & Business Media, LLC. — 2007
  10. **Botvina L.R.** Razrusheniye: kinetika, mekhanizmy, obshchiye zakonomernosti. — M.: Nauka. — 2008 (in Russian)
  11. **Ashby M.F. and Jones D.R.H.** Engineering Materials. An Introduction to Their Properties and Applications. 3-rd ed. — Oxford: Elsevier Science. — 2005
  12. **Murakami Y. and Endo M.** Quantitative Evaluation of Fatigue Strength of Metals Containing Various Small Defects or Cracks // Engineering Fracture Mechanics. — 1983, no. 17, 1—15
  13. **Murakami Y. and Endo M.** Effects of Defects, Inclusions and Inhomogeneities on Fatigue Strength // International Journal of Fatigue. — 1994, no. 16, 163—182
  14. **Murakami Y.** Metal Fatigue: The Effects of Small Defects and Nonmetallic Inclusions. — Oxford, UK: Elsevier. — 2002
  15. **Åman M., Tanaka Y., Murakami Y., Remes H., and Marquis G.** Fatigue Strength Evaluation of Small Defect at Stress Concentration // Procedia Structural Integrity. — 2017, no. 7, 351—358. DOI: 10.1016/j.prostr.2017.11.099
  16. **Zolotarevskiy V.S.** Mekhanicheskiye svoystva metallov. — M.: MISIS. — 1998 (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)