

УДК 621.793.1(620.18+620.178.162)

Инженерные соотношения для расчетно-аналитического прогнозирования износа покрытий при трибологических испытаниях

О.В. Кудряков^{1,2}, В.И. Колесников¹, Д.С. Мантуров¹, И.В. Колесников¹, В.Н. Варавка²

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

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

Поступила в редакцию 11.03.2024.

После доработки 17.04.2024.

Принята к публикации 18.04.2024.

В работе поставлена задача определения условий трибологических испытаний покрытий, в которых покрытие реализует свой потенциал физико-механических и трибологических свойств независимо от подложки. Использована стандартная методика трибологических испытаний на машине трения по схеме «штифт-пластина» с круговым движением сферического штифта-индентора. Приведены экспериментальные данные исследования структуры и свойств вакуумных ионно-плазменных нитридных покрытий TiN, TiAlN, CrAlSiN толщиной 0,8—4,0 мкм, нанесённых на пластинчатые стальные образцы, предназначенные для испытаний на машине трения. Процесс изнашивания покрытий рассмотрен с позиций механики контактного разрушения и теорий усталости. Предложена расчётно-аналитическая модель для количественной оценки параметров контакта и изнашивания при испытаниях на трение: размера контактной площадки, глубины контактного сближения, глубины пластической зоны, напряжений в покрытии, предела усталости, критической толщины покрытия, исключаяющей его прогиб. 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, сканирующая электронная микроскопия, физико-механические свойства, трибологические свойства, испытания на износостойкость, механизмы износа покрытий, трение скольжения, механика контактного разрушения, усталость.

DOI: 10.32864/0202-4977-2024-45-2-171-182

Адрес для переписки:

О.В. Кудряков
Ростовский государственный университет путей сообщения,
пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2,
Ростов-на-Дону 344038, Россия
e-mail: kudryakov@mail.ru

Для цитирования:

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

Инженерные соотношения для расчетно-аналитического прогнозирования износа покрытий при трибологических испытаниях.

Трение и износ.

2024. — Т. 45, № 2. — С. 171—182.

DOI: 10.32864/0202-4977-2024-45-2-171-182

Address for correspondence:

O.V. Kudryakov
Rostov State Transport University,
Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., 2,
Rostov-on-Don, 344038, Russia
e-mail: kudryakov@mail.ru

For citation:

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

[Engineering Relationships for Computational and Analytical Prediction of Coating Wear During Tribological Tests].

Trenie i Iznos.

2024, vol. 45, no. 2, pp. 171—182 (in Russian).

DOI: 10.32864/0202-4977-2024-45-2-171-182

Engineering Relationships for Computational and Analytical Prediction of Coating Wear During Tribological Tests

O.V. Kudryakov^{1,2}, V.I. Kolesnikov¹, D.S. Manturov¹, I.V. Kolesnikov¹, and V.N. Varavka²

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

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

Received 11.03.2024.

Revised 17.04.2024.

Accepted 18.04.2024.

Abstract

The work sets the task of determining the conditions for tribological testing of coatings, in which the coating realizes its potential of physical, mechanical and tribological properties regardless of the substrate. A standard method of tribological testing was used on a friction machine according to the “pin-disk” scheme with a circular motion of a spherical indenter pin. Experimental data are presented on the study of the structure and properties of vacuum ion-plasma nitride coatings TiN, TiAlN, CrAlSiN. The coatings had a thickness of 0.8–4.0 microns and were applied to plate steel samples intended for testing in a friction machine. The wear process of coatings is considered from the perspective of contact fracture mechanics and fatigue theories. A calculation and analytical model is proposed for quantitative assessment of contact and wear parameters during 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; critical thickness of the coating, which excludes its deflection. To assess the wear of coatings in this case, it is recommended to use fatigue failure models with the construction of a Woehler 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 nitride coatings using a database of our own experimental data.

Keywords: ion plasma technology, nitride coatings, scanning electron microscopy, physical and mechanical properties, tribological properties, wear resistance tests, coating wear mechanisms, sliding friction, contact fracture mechanics, fatigue.

DOI: 10.32864/0202-4977-2024-45-2-171-182

Адрес для переписки:

О.В. Кудряков
Ростовский государственный университет путей сообщения,
пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2,
Ростов-на-Дону 344038, Россия
e-mail: kudryakov@mail.ru

Для цитирования:

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

Инженерные соотношения для расчетно-аналитического
прогнозирования износа покрытий при трибологических
испытаниях.

Трение и износ.

2024. – Т. 45, № 2. – С. 171–182.

DOI: 10.32864/0202-4977-2024-45-2-171-182

Address for correspondence:

O.V. Kudryakov
Rostov State Transport University,
Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya Sq., 2,
Rostov-on-Don, 344038, Russia
e-mail: kudryakov@mail.ru

For citation:

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

[Engineering Relationships for Computational and Analytical
Prediction of Coating Wear During Tribological Tests].

Trenie i Iznos.

2024, vol. 45, no. 2, pp. 171–182 (in Russian).

DOI: 10.32864/0202-4977-2024-45-2-171-182

Список использованных источников

1. Белый А.В., Карпенко Г.Д., Мышкин Н.К. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев. — М.: Машиностроение. — 1991
2. Freund L.B. and Suresh S. Thin Film Materials: Stress, Defect Formation and Surface Evolution. — Boston: Cambridge University Press. — 2009
3. Наноструктурные покрытия / под ред. А. Кавалейро, Д. де Хоссона. — М.: Техносфера. — 2011
4. 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
5. Способ нанесения износостойких покрытий и повышения долговечности деталей: патент РФ: RU2161661C1 (C23C14/5833). Опубл. 10.01.2001. / А.Н. Падеров, Ю.Г. Векслер
6. Кирюханцев-Корнеев Ф.В., Шевейко А.Н., Петржик М.И. Пути повышения адгезионной прочности твердых износостойких наноструктурных покрытий в системе Ti–B–(Cr, Si, C)–N // Физикохимия поверхности и защита материалов. — 2019 (55), № 3, 304–313
7. Major L., Major R., Kot M., Lackner J.M., and Major B. Ex situ and in situ Nanoscale Wear Mechanisms Characterization of Zr/ZrN Tribological Coatings // Wear. — 2018 (404–405), 82–91
8. Панин В.Е., Панин А.В., Моисеенко Д.Д. «Шахматный» мезоэффект интерфейса в гетерогенных средах в полях внешних воздействий // Физ. мезомех. — 2006 (9), № 6, 5–15
9. Панин В.Е. Физическая мезомеханика материалов. Том 1; том 2. — Томск: ТГУ. — 2015
10. 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
11. 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. DOI: 10.24411/1683-805X-2020-11006
12. Колесников В.И., Кудряков О.В., Варавка В.Н., Мантуров Д.С., Новиков Е.С. Влияние адгезионных свойств вакуумных ионно-плазменных покрытий TiAlN на износостойкость при трении // Трение и износ. — 2021 (42), № 5, 495–507. DOI: 10.32864/0202-4977-2021-42-5-495-507
13. Oliver W.C. and Pharr G.M. An Improved Technique for Determining Hardness and Elastic Modulus Using Load and Displacement Sensing Indentation Experiments // Journal of Materials Research. — 1992 (7), no. 6, 1564–1583. <https://doi.org/10.1557/JMR.1992.1564>

14. Nanoindentation / Fischer-Cripps A.C. (Ed.). — New York: Springer-Verlag. — 2004. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-5943-3>
15. Колесников Ю.В., Морозов Е.М. Механика контактного разрушения. — М.: Изд-во ЛКИ. — 2007

References

1. Belyy A.V., Karpenko G.D., Myshkin N.K. Struktura i metody formirovaniya iznosostoykikh poverkhnostnykh slojev. — M.: Mashinostroyeniye. — 1991 (in Russian)
2. Freund L.B. and Suresh S. Thin Film Materials: Stress, Defect Formation and Surface Evolution. — Boston: Cambridge University Press. — 2009
3. Cavaleiro A. and De Hosson J.T. Nanostructure Coatings. — New York: Springer Science+Business Media, LLC. — 2006
4. 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
5. Sposob naneseniya iznosostoykikh pokrytiy i povysheniya dolgovechnosti detaley: patent RF: RU2161661C1 (C23C14/5833). Opubl. 10.01.2001. / A.N. Paderov, Yu.G. Veksler (in Russian)
6. Kiryukhantsev-Korneyev F.V., Sheveyko A.N., Petrzhik M.I. Puti povysheniya adgezionnoy prochnosti tverdykh iznosostoykikh nanostrukturnykh pokrytiy v sisteme Ti–B–(Cr, Si, C)–N // Fizikokhimiya poverkhnosti i zashchita materialov. — 2019 (55), № 3, 304–313 (in Russian)
7. Major L., Major R., Kot M., Lackner J.M., and Major B. Ex situ and in situ Nanoscale Wear Mechanisms Characterization of Zr/ZrN Tribological Coatings // Wear. — 2018 (404–405), 82–91
8. Panin V.Ye., Panin A.V., Moiseyenko D.D. «Shakhmatnyy» mezoefekt interfeysa v geterogennykh sredakh v polyakh vneshnikh vozddeystviy // Fiz. mezhmekh. — 2006 (9), № 6, 5–15 (in Russian)
9. Panin V.Ye. Fizicheskaya mezhmekhanika materialov. Tom 1; Tom 2. — Tomsk: TGU. — 2015 (in Russian)
10. 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
11. Kolesnikov V.I., Kudryakov O.V., Zabiya I.Yu., Novikov E.S., and Manturov D.S. Structural Aspects of Wear Resistance of Coatings Deposited by Physical Vapor Deposition // Physical Mesomechanics. — 2020 (23), no. 6, 570–583. DOI: 10.1134/S1029959920060132
12. Kolesnikov V.I., Kudryakov O.V., Varavka V.N., Manturov D.S., and Novikov E.S. Relationship between the Adhesive Properties of Vacuum Ion-Plasma TiAlN Coatings and Wear Resistance in

- Friction // Journal of Friction and Wear. — 2021 (42), no. 5, 317—326. DOI: 10.3103/S106836662105007X)
13. **Oliver W.C. and Pharr G.M.** An Improved Technique for Determining Hardness and Elastic Modulus Using Load and Displacement Sensing Indentation Experiments // Journal of Materials Research. — 1992 (7), no. 6, 1564—1583. <https://doi.org/10.1557/JMR.1992.1564>
14. **Nanoindentation** / Fischer-Cripps A.C. (Ed.). — New York: Springer-Verlag. — 2004. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-5943-3>
15. **Kolesnikov Yu.V., Morozov Ye.M.** Mekhanika kontaktnogo razrusheniya. — M.: Izd-vo LKI. — 2007 (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