

УДК 621.793.1(620.18+620.178.162.4)

Особенности формирования и прогнозирования триботехнических свойств ионно-плазменных алмазоподобных покрытий при стабилизации азотом

В.И. Колесников¹, О.В. Кудряков², А.И. Воропаев¹, И.В. Колесников¹, В.Н. Варавка², М.С. Лифарь^{1,3}, А.А. Гуда^{1,3}, Д.С. Мантуров¹, Е.С. Новиков¹

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

²Донской государственный технический университет (ДГТУ),
пл. Гагарина, д. 1, г. Ростов-на-Дону 344000, Россия

³Южный федеральный университет (ЮФУ), Международный исследовательский институт интеллектуальных материалов,
ул. Сладкова, 178/24, г. Ростов-на-Дону 344090, Россия

Поступила в редакцию 27.10.2023.

После доработки 08.02.2024.

Принята к публикации 15.02.2024.

Представлен один из вариантов решения научно-прикладной задачи прогнозируемого формирования триботехнических характеристик ионно-плазменного покрытия. Поставленная задача решается путём создания и последующего анализа базы данных углеродных покрытий. Объектом исследований в работе являются ионно-плазменные покрытия DLC, нанесённые на стальную подложку. Показано, что использование азота для стабилизации углеродных покрытий вместо водорода обеспечивает не только получение устойчивых значений толщины покрытий DLC на уровне 1,0—1,5 мкм, но и служит важным и удобным технологическим параметром для регулирования триботехнических характеристик покрытия в процессе его нанесения. На основе прогнозируемых и экспериментальных значений коэффициента трения μ и данных длины пробега образца L определены интервалы оптимальных значений технологических параметров %N и λ . Исследованные углеродные ионно-плазменные покрытия DLC, полученные по установленным оптимальным режимам нанесения, могут быть рекомендованы для прикладного использования в условиях трения, эквивалентных проведенным триботехническим испытаниям при нагрузке трения $F \approx 10$ Н.

Ключевые слова: вакуумная ионно-плазменная технология, алмазоподобные покрытия (DLC), микроструктура покрытий, механические свойства, испытания на трение скольжением, триботехнические свойства, машинное обучение, нейросетевые алгоритмы.

DOI: 10.32864/0202-4977-2024-45-1-16-28

Адрес для переписки:

О.В. Кудряков
ДГТУ, пл. Гагарина, д. 1, г. Ростов-на-Дону 344000, Россия
e-mail: kudryakov@mail.ru

Address for correspondence:

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

Для цитирования:

В.И. Колесников, О.В. Кудряков, А.И. Воропаев, И.В. Колесников,
В.Н. Варавка, М.С. Лифарь, А.А. Гуда, Д.С. Мантуров,
Е.С. Новиков.

Особенности формирования и прогнозирования триботехнических свойств ионно-плазменных алмазоподобных покрытий при стабилизации азотом.

Трение и износ.
2024. — Т. 45, № 1. — С. 16–28.

DOI: 10.32864/0202-4977-2024-45-1-16-28

For citation:

V.I. Kolesnikov, O.V. Kudryakov, A.I. Voropaev, I.V. Kolesnikov,
V.N. Varavka, M.S. Lifar, A.A. Guda, D.S. Manturov, and
E.S. Novikov.

[Formation and Prediction of Tribotechnical Properties of Ion-Plasma Diamond-Like Coatings under Stabilization with Nitrogen].
Trenie i Iznos.

2024, vol. 45, no. 1, pp. 16–28 (in Russian).

DOI: 10.32864/0202-4977-2024-45-1-16-28

Formation and Prediction of Tribotechnical Properties of Ion-Plasma Diamond-Like Coatings under Stabilization with Nitrogen

V.I. Kolesnikov¹, O.V. Kudryakov², A.I. Voropaev¹, I.V. Kolesnikov¹, V.N. Varavka², M.S. Lifar^{1,3}, A.A. Guda^{1,3}, D.S. Manturov¹, 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

³Southern Federal University (SFedU), The Smart Materials Research Institute,
Sladkova st. 178/24, Rostov-on-Don 344090, Russia

Received 27.10.2023.

Revised 08.02.2024.

Accepted 15.02.2024.

Abstract

The paper presents one of the options for solving the scientific and applied problem of the predicted formation of tribotechnical characteristics of an ion-plasma coating. The problem is solved by creating and subsequently analyzing a database of carbon coatings, including technological parameters of coating application, their elemental compositions, structural and morphological characteristics of coatings, their physical, mechanical and tribological properties, as well as characteristics of the substrate and indicators of the quality of its surface. The object of research in this work is DLC ion plasma coatings deposited on a steel substrate. The work shows that the use of nitrogen to stabilize carbon coatings instead of hydrogen ensures not only obtaining stable thicknesses of DLC coatings at the level of 1.0—1.5 μm , but also serves as an important and convenient technological parameter for regulating the tribological characteristics of the coating during its application. Based on the predicted and experimental values of the friction coefficient μ and data on the sample run length L , the intervals of optimal values of the technological parameters %N and λ were determined. The studied carbon ion-plasma DLC coatings, obtained according to the established optimal application modes, can be recommended for applied use under friction conditions equivalent to the tribotechnical tests carried out at a friction load of $F \approx 10 \text{ N}$.

Keywords: vacuum ion-plasma technology, diamond-like coatings (DLC), microstructure of coatings, mechanical properties, sliding friction tests, tribotechnical properties, machine learning, neural network algorithms.

DOI: 10.32864/0202-4977-2024-45-1-16-28

Адрес для переписки:

О.В. Кудряков
ДГТУ, пл. Гагарина, д. 1, г. Ростов-на-Дону 344000, Россия
e-mail: kudryakov@mail.ru

Для цитирования:

В.И. Колесников, О.В. Кудряков, А.И. Воропаев, И.В. Колесников,
В.Н. Варавка, М.С. Лифарь, А.А. Гуда, Д.С. Мантуров,
Е.С. Новиков.

Особенности формирования и прогнозирования триботехнических свойств ионно-плазменных алмазоподобных покрытий при стабилизации азотом.

Трение и износ.
2024. — Т. 45, № 1. — С. 16—28.

DOI: 10.32864/0202-4977-2024-45-1-16-28

Address for correspondence:

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

For citation:

V.I. Kolesnikov, O.V. Kudryakov, A.I. Voropaev, I.V. Kolesnikov,
V.N. Varavka, M.S. Lifar, A.A. Guda, D.S. Manturov, and
E.S. Novikov.

[Formation and Prediction of Tribotechnical Properties of Ion-Plasma Diamond-Like Coatings under Stabilization with Nitrogen].
Trenie i Iznos.

2024, vol. 45, no. 1, pp. 16—28 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2024-45-1-16-28

Список использованных источников

1. **Белый А.В. и др.** Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев / А.В. Белый, Г.Д. Карпенко, Н.К. Мышкин. — М.: Машиностроение. — 1991
2. **Musil J.** Hard and Superhard Nanocomposite Coatings // *Surface & Coatings Technology*. — 2000 (**125**), 322—330. DOI: 10.1016/s0257-8972(99)00586-1
3. **Наноструктурные покрытия** / под ред. А. Кавалейро, Д. де Хоссона. — М.: Техносфера. — 2011
4. **Ильин А.А., Плихунов В.В., Петров Л.М., Спектор В.С.** Вакуумная ионно-плазменная обработка. — М.: ИНФРА-М. — 2014
5. **Ming Lou, Kai Xu, Leilei Chen, Chengyuan Hong, Yuan Yuan, Yujie Du, Yong Du, and Keke Chang.** Development of Robust Surfaces for Harsh Service Environments from the Perspective of Phase Formation and Transformation // *Journal of Materials Informatics*. — 2021 (**1**), 5. DOI: 10.20517/jmi.2021.02
6. **Baba K., Hatada R., Flege S., and Ensinger W.** Diamond-Like Carbon Films with Low Internal Stress by a Simple Bilayer Approach // *Coatings*. — 2020 (**10**), no. 7, 696. DOI: 10.3390/coatings10070696
7. **Ковалева М.Г., Колпаков А.Я., Поплавский А.И., Галкина М.Е., Герус Ж.В., Любушкин Р.А., Мишунин М.В.** Триботехнические свойства покрытий на основе углерода и углерода, легированного азотом, полученных импульсным вакуумно-дуговым методом // *Трение и износ*. — 2018 (**39**), № 4, 433—437
8. **Колесников В.И., Верескун В.Д., Кудряков О.В., Мантуров Д.С., Попов О.Н., Новиков Е.С.** Технология повышения износостойкости тяжело нагруженных трибосистем и их мониторинг // *Трение и износ*. — 2020 (**41**), № 2, 228—234. DOI: 10.3103/S1068366620020051
9. **Kudryakov O.V., Varavka V. N., Kolesnikov I.V., Novikov E.S., and Zabiya I.Yu.** DLC Coatings for Tribotechnical Purposes: Features of the Structure and Wear Resistance // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. — 2021 (**1029**), no. 1, 012061. DOI: 10.1088/1757-899X/1029/1/012061
10. **Dementjev A.P. and Petukhov M.N.** Comparison of X-Ray-Excited Auger Lineshapes of Graphite, Polyethylene and Diamond // *Surface and Interface Analysis*. — 1996 (**24**), 517—521
11. **Charitidis C.A.** Nanomechanical and Nanotribological Properties of Carbon-Based Thin Films: A Review // *Int. J. Refract. Metals Hard Mater.* — 2010 (**28**), 51. DOI:10.1016/j.jrmhm.2009.08.003
12. **Charitidis C.A., Koumoulos E.P., and Dragatogiannis D.A.** Nanotribological Behavior of Carbon Based Thin Films: Friction and Lubricity

- Mechanisms at the Nanoscale // *Lubricants*. — 2013, no. 1, 22—47. DOI: 10.3390/lubricants1020022
13. **Ohkubo I.** Realization of Closed-Loop Optimization of Epitaxial Titanium Nitride Thin-Film Growth via Machine Learning // *Materials Today Physics*. — 2021 (**16**), 100296. DOI: 10.1016/j.mtphys.2020.100296
14. **Lifar M.S., Guda S.A., Kudryakov O.V. et al.** Relationships between Synthesis Conditions and TiN Coating Properties Discovered from the Data Driven Approach // *Thin Solid Films*. — 2023 (**768**), 139725. DOI: 10.1016/j.tsf.2023.139725.
15. **Robertson J.** Diamond-Like Amorphous Carbon // *Mater. Sci. Eng.* — 2002 (**R 37**), 129—281

References

1. **Beliy A.V. etc.** Structure and methods of formation of wear-resistant surface layers. — Moscow: Mechanical Engineering. — 1991 (in Russian)
2. **Musil J.** Hard and Superhard Nanocomposite Coatings // *Surface & Coatings Technology*. — 2000 (**125**), 322—330. DOI: 10.1016/s0257-8972(99)00586-1
3. **Nanostructured Coatings** / ed. by A. Cavaleiro, J.T. de Hosson. — New York: Springer Science & Business Media, LLC. — 2007
4. **Ilyin A.A., Plihunov V.V., Petrov L.M., Spector V.S.** Vacuum ion-plasma treatment. — Moscow: INFRA-M. — 2014 (in Russian)
5. **Ming Lou, Kai Xu, Leilei Chen, Chengyuan Hong, Yuan Yuan, Yujie Du, Yong Du, and Keke Chang.** Development of Robust Surfaces for Harsh Service Environments from the Perspective of Phase Formation and Transformation // *Journal of Materials Informatics*. — 2021 (**1**), 5. DOI: 10.20517/jmi.2021.02
6. **Baba K., Hatada R., Flege S., and Ensinger W.** Diamond-Like Carbon Films with Low Internal Stress by a Simple Bilayer Approach // *Coatings*. — 2020 (**10**), no. 7, 696. DOI: 10.3390/coatings10070696
7. **Kovaleva M.G., Kolpakov A.J., Poplavsky A.I., Galkina M.E., Lyubushkin R.A., Mishunin M.V., and Gerus J.V.** Properties of Coatings Based on Carbon and Nitrogen-Doped Carbon Obtained Using a Pulsed Vacuum Arc Method // *Journal of friction and wear*. — 2018 (**39**), no. 4, 345—348
8. **Kolesnikov V.I., Vereskun V.D., Kudryakov O.V., Manturov D.S., Popov O.N., and Novikov E.S.** Technologies for Improving the Wear Resistance of Heavy-Loaded Tribosystems and Their Monitoring // *Journal of Friction and Wear*. — 2020 (**41**), no. 2, 169—173. DOI: 10.3103/S1068366620020051
9. **Kudryakov O.V., Varavka V. N., Kolesnikov I.V., Novikov E.S., and Zabiya I.Yu.** DLC Coatings for Tribotechnical Purposes: Features of the Structure and Wear Resistance // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. — 2021 (**1029**),

- no. 1, 012061. DOI: 10.1088/1757-899X/1029/1/012061
10. **Dementjev A.P. and Petukhov M.N.** Comparison of X-Ray-Excited Auger Lineshapes of Graphite, Polyethylene and Diamond // Surf. Interface Anal. — 1996 (**24**), 517—521
 11. **Charitidis C.A.** Nanomechanical and Nanotribological Properties of Carbon-Based Thin Films: A Review // Int. J. Refract. Metals Hard Mater. — 2010 (**28**), 51. DOI:10.1016/j.ijrmhm.2009.08.003
 12. **Charitidis C.A., Koumoulos E.P., and Dragatogiannis D.A.** Nanotribological Behavior of Carbon Based Thin Films: Friction and Lubricity Mechanisms at the Nanoscale // Lubricants. — 2013, no. 1, 22—47. DOI: 10.3390/lubricants1020022
 13. **Ohkubo I.** Realization of Closed-Loop Optimization of Epitaxial Titanium Nitride Thin-Film Growth via Machine Learning // Materials Today Physics. — 2021 (**16**), 100296. DOI: 10.1016/j.mtphys.2020.100296
 14. **Lifar M.S., Guda S.A., Kudryakov O.V. et al.** Relationships between Synthesis Conditions and TiN Coating Properties Discovered from the Data Driven Approach // Thin Solid Films. — 2023 (**768**), 139725. DOI: 10.1016/j.tsf.2023.139725.
 15. **Robertson J.** Diamond-Like Amorphous Carbon // Mater. Sci. Eng. — 2002 (**R 37**), 129—281

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@mpri.org.by