

УДК 621.891:539.23

## Влияние микроструктуры и состава легированных молибденом и вольфрамом вакуумных ионно-плазменных углеродных покрытий на их триботехнические характеристики при сухом трении и граничной смазке

И.А. Буяновский<sup>1</sup>, М.М. Хрущов<sup>1</sup>, Д.А. Суляндзига<sup>2</sup>, В.Д. Самусенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, М. Харитоньевский пер., д. 4., г. Москва 101000, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, д. 1., г. Москва 119991, Россия

Поступила в редакцию 28.10.2024.

После доработки 05.02.2025.

Принята к публикации 14.02.2025.

Исследовано влияние химического и фазового состава, структуры и триботехнические характеристики двух типов вакуумных ионно-плазменных антифрикционных углеродных покрытий, легированных соответственно молибденом и вольфрамом. Триботехнические характеристики исследуемых покрытий оценивались на четырёхшариковой машине трения с модернизированной оправкой как при сухом трении, так и при трении в режиме граничной смазки в инактивной (полиальфаолефиновое масло ПАО-4), поверхностно-активной (ПАО-4 + 1 мас. % олеиновой кислоты) и химически активной (то же масло + 2 мас. % присадки ДФ-11) смазочных средах. Установлено, что все исследованные покрытия существенно снижают как потери на трение, так и износ. Обнаружено, что легирование почти так же снижает трение, как исследуемые смазочные материалы. Так, при сухом трении шарика из стали ШХ-15 по цилиндрическим поверхностям роликов из той же стали, был получен коэффициент трения  $\sim 0,8$ ; при трении шара по роликам, на который нанесено покрытие из «монокристаллического углерода» легированного молибденом, коэффициент сухого трения составляет  $\sim 0,7$ ; дополнительно в среде инактивного масла эта пара трения обеспечивает коэффициент трения  $0,12\text{—}0,14$ ; а в среде масла с химически активной серосодержащей присадкой коэффициент трения снижается до  $0,05$ . Для пары трения сталь — алмазоподобное покрытие легированное молибденом, при граничной смазке поверхностно-активной композицией, минимальный коэффициент трения составил  $0,09$ . Учёт полученных результатов позволит оптимизировать процесс создания высокоэффективных смазочных материалов для тяжело нагруженных узлов трения.

**Ключевые слова:** аморфный углерод, алмазоподобный углерод, линейно-цепочечный углерод, граничная смазка, легирование, коэффициент трения, граничная смазка, износ, молибден, вольфрам, фазовое состояние покрытий, машина трения.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2025-46-1-26-39

**Адрес для переписки:**

И.А. Буяновский  
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук,  
М. Харитоньевский пер., д. 4., г. Москва 101000, Россия  
e-mail: buyan37@mail.ru

**Для цитирования:**

И.А. Буяновский, М.М. Хрущов, Д.А. Суляндзига, В.Д. Самусенко.  
Влияние микроструктуры и состава легированных молибденом и вольфрамом вакуумных ионно-плазменных углеродных покрытий на их триботехнические характеристики при сухом трении и граничной смазке.  
Трение и износ.  
2025. — Т. 46, № 1. — С. 26–39.  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2025-46-1-26-39

**Address for correspondence:**

I.A. Buyanovskii  
Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences,  
M. Kharitonyevsky lane, 4, Moscow 101000, Russia  
e-mail: buyan37@mail.ru

**For citation:**

I.A. Buyanovskii, M.M. Khrushchov, D.A. Sulyandziga, and V.D. Samusenko.  
[Effect of Microstructure and Composition of Molybdenum and Tungsten-Doped Vacuum Ion-Plasma Carbon Coatings on Their Tribotechnical Properties under Dry Friction and Boundary Lubrication].  
*Trenie i Iznos*.  
2025, vol. 46, no. 1, pp. 26–39 (in Russian).  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2025-46-1-26-39

# Effect of Microstructure and Composition of Molybdenum and Tungsten-Doped Vacuum Ion-Plasma Carbon Coatings on Their Tribotechnical Properties under Dry Friction and Boundary Lubrication

I.A. Buyanovskii<sup>1</sup>, M.M. Khrushchov<sup>1</sup>, D.A. Sulyandziga<sup>2</sup>, and V.D. Samusenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences,  
M. Kharitonyevsky lane, 4, Moscow 101000, Russia

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University,  
Leninskie Gory, no. 1, Moscow 119991, Russia

Received 28.10.2024.

Revised 05.02.2024.

Accepted 14.02.2025.

## Abstract

The paper presents the results of a study of the chemical and phase composition, structure, physical-mechanical and tribological characteristics of two types of vacuum ion-plasma antifriction carbon coatings alloyed with molybdenum and tungsten, respectively. The first of these types of coatings has a highly oriented linear-chain structure; the second type is an amorphous hydrogenated carbon. The tribotechnical characteristics of the studied coatings were evaluated on a four-ball machine with a modernized friction unit and were carried out both under dry friction and under friction in the boundary lubrication mode in inactive (polyalphaolefin oil PAO-4), surface-active (PAO-4 + 1 % by weight of oleic acid) and chemically active (the same oil + 2 % by weight of DF-11 additive) lubricating environments. It was found that the coating with both “monocrystal” carbon and diamond-like carbon, both alloyed and unalloyed, significantly reduced friction losses and wear of the steel samples to which the coatings were applied, and alloying of these coatings reduced friction almost as much as the studied lubricants. Thus, under dry friction of a ball made of ShKh-15 steel on the cylindrical surfaces of rollers made of the same steel, the friction coefficient obtained was ~ 0.8; when a ball rubs against rollers coated with a molybdenum-doped “monocrystalline carbon” coating, the dry friction coefficient is ~ 0.7; additionally, in an inactive oil environment, this friction pair provides a friction coefficient of 0.12—0.14; and in a chemically active sulfur-containing oil environment, the friction coefficient decreases to 0.05. For a friction pair of steel — molybdenum-doped diamond-like coating, with boundary lubrication by a surface-active composition, the minimum friction coefficient is 0.09. Taking into account the obtained results of the proposed study will allow optimizing the process of creating highly effective lubricants for heavily loaded friction units.

**Keywords:** amorphous carbon, diamond-like carbon, linear-chain carbon, orienting coatings, boundary lubrication, alloying, friction coefficient, boundary lubrication, wear, molybdenum, tungsten, phase state of coatings, friction machine.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2025-46-1-26-39

---

### Адрес для переписки:

И.А. Буяновский  
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук,  
М. Харитоньевский пер., д. 4., г. Москва 101000, Россия  
e-mail: buyan37@mail.ru

---

### Address for correspondence:

I.A. Buyanovskii  
Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences,  
M. Kharitonyevsky lane, 4, Moscow 101000, Russia  
e-mail: buyan37@mail.ru

---

### Для цитирования:

И.А. Буяновский, М.М. Хрущов, Д.А. Суляндзига, В.Д. Самусенко.  
Влияние микроструктуры и состава легированных молибденом и вольфрамом вакуумных ионно-плазменных углеродных покрытий на их триботехнические характеристики при сухом трении и граничной смазке.  
Трение и износ.  
2025. — Т. 46, № 1. — С. 26—39.  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2025-46-1-26-39

---

### For citation:

I.A. Buyanovskii, M.M. Khrushchov, D.A. Sulyandziga, and V.D. Samusenko.  
[Effect of Microstructure and Composition of Molybdenum and Tungsten-Doped Vacuum Ion-Plasma Carbon Coatings on Their Tribotechnical Properties under Dry Friction and Boundary Lubrication].  
*Trenie i Iznos*.  
2025, vol. 46, no. 1, pp. 26—39 (in Russian).  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2025-46-1-26-39

## Список использованных источников

1. Bewilogua K. and Hoffman D. History of Diamond-Like Carbon Films – from Experiments to Wordwise Application // Surf. Coating Technol. — 2014 (242), 214—235. doi: 10.1016/j.surfcoat.2014.01.031
2. Tyagi A., Walia R.S., Oasim M., Pandey S.M., Tyagi M.K., and Bharat B. A Critical Review of Diamond-Like Carbon Coatings for Wear Resistance Applications // Int. J. Refract. Met. Hard Mater. — 2019 (78), 107—122
3. **Современные технологии модифицирования поверхностей деталей машин** / Под ред. Г.К. Москвитина. — М.: УРСС/ЛЕНАНД. — 2013
4. Горячева И.Г., Торская Е.В., Корнев Ю.В., Ковалева И.Н., Мышкин Н.К. Теоретико-экспериментальное исследование механических свойств бикомпонентных покрытий, конденсируемых из паров металлов // Трение и износ. — 2015 (36), № 3, 340—343
5. Семёнов А.П., Хрущов М.М. Влияние внешней среды и температуры на трибологические свойства алмазных и алмазоподобных покрытий // Трение и износ. — 2010 (31), № 2, 195—217
6. Kalin M., Velkavrh I., and Vizintin J. Role of Adsorption and Tribophysical Parameters in Lubrication of DLC // Proceedings on the Tribology Congress IV (WTC 2009). — Kyoto. — 2009, 25
7. Стрелецкий О.А., Иваненко И.П., Хвостов В.В., Савченко Н.Ф., Нишак О.Ю., Александров А.Ф. Структурные особенности углеродных материалов, синтезированных различными методами // Физика твёрдого тела. — 2016 (58), 2044—2049
8. Kalin M., Velkavrh I., Vizintin J., and Osbolt L. Review of Boundary Lubrication Mechanisms of DLC Coatings Used in Mechanical Application // Meccanica. — 2008 (43), no. 6, 623—637
9. Miyake S., Mitsuyoshi K., Kurosaka W., Matsu-moto Y., Saito Y., Yasuda Y., and Okamoto Y. Boundary Lubrication Characteristic of Metal-Containing Diamond-Like Carbon (DLC) Films with Poly Alpha Olefin (PAO) Lubricant // Tribol. Online. — 2008 (3), no. 5, 310—315
10. Zapid R., Zapid R., Masjuki H.H., Varman H., Mufti K.A., Kasam M.A., and Guslar M. Effect of Lubricant Formulation on the Tribological Performance of Self-Mated Dropped DLC Contacts. A Review // Tribol. Letter. — 2015 (58), no. 2, 1—28.
11. Буяновский И.А., Хрущов М.М., Самусенко В.Д. Алмазоподобные углеродные покрытия: трибологическое поведение при граничной смазке: ч. 1. Структура, методы испытаний, смазка адсорбционными слоями // Материаловедение. — 2021, № 9, 3—16; ч. 2. Смазка химически модифицированным слоем // там же. № 10, 3—11
12. Семёнов А.П. Трибологические свойства и вакуумные ионно-плазменные методы получения алмазных и алмазоподобных покрытий // Трение и износ. — 2009 (30), № 1, 83—102.
13. **Антифрикционное покрытие**: патент РФ на изобретение. RU 2528449 С1. 29.07.2020. / А.Ю. Албагачиев, И.А. Буяновский, В.А. Левченко, В.Д. Самусенко
14. Тополянский П.А., Тополянский А.П., Ермаков С.А., Канаев А.Т., Бийжанов С.К., Сарсембаева Т.Е. Сертификация материалов и покрытий по физико-механическим характеристикам поверхностного слоя // Вестник современных исследований. — Омск: НЦ «Орка». — 2018. № 10–1 (25), 354—366
15. Авдюхина В.М., Хрущов М.М., Суляндзига Д.А., Левин И.С. Рентгенографические исследования влияния структурно-фазовых характеристик на трибологическое поведение упрочняющих покрытий на основе молибдена и вольфрама // Кристаллография. — 2023 (68), № 3, 455—464

## References

1. Bewilogua K. and Hoffman D. History of Diamond-Like Carbon Films – from Experiments to Wordwise Application // Surf. Coating Technol. — 2014 (242), 214—235. doi: 10.1016/j.surfcoat.2014.01.031
2. Tyagi A., Walia R.S., Oasim M., Pandey S.M., Tyagi M.K., and Bharat B. A critical Review of Diamond-Like Carbon Coatings for Wear Resistance Applications // Int. J. Refract. Met. Hard Mater. — 2019 (78), 107—122
3. **Modern Technologies for modifying the surface of machine parts** / Ed by G.K. Moskvitin. — Moscow: URSS/LENAND. — 2013 (in Russian)
4. Goryacheva I.G., Torskaya E.V., Kornev Yu.V., Kovaleva I.N., and Myshkin N. K. Theoretical and Experimental Study of the Mechanical Properties of Bicomponent Metal Vapor Deposited Coatings// Journal of Friction and Wear. — 2015 (36), no. 3, 262—265. DOI: 10.3103/S1068366615030058
5. Semenov A.P. and Khrushchov M.M. Influence of the External Media and Temperature on the Tribological Properties of Diamond and Diamond-Like Coatings // Friction and Wear. — 2010 (31), no. 2, 195—217 (in Russian).
6. Kalin M., Velkavrh I., and Vizintin J. Role of Adsorption and Tribophysical Parameters in Lubrication of DLC // Proceedings on the Tribology Congress IV (WTC 2009). — Kyoto. — 2009, 25.
7. Streletskiy O.A., Ivanenko I.P., Khvostov V.V., Savchenko N.F., Nishak O.Yu., Alexandrov A.F. Structural features of carbon materials synthesized by various methods // Solid State Physics. — 2016 (58), 2044—2049 (in Russian)
8. Kalin M., Velkavrh I., Vizintin J., and Osbolt L. Review of Boundary Lubrication Mechanisms of

- DLC Coatings Used in Mechanical Application // *Meccanica*. — 2008 (43), no. 6, 623—637
9. **Miyake S., Mitsuyoshi K., Kurosaka W., Matsumoto Y., Saito Y., Yasuda Y., and Okamoto Y.** Boundary Lubrication Characteristic of Metal-Containing Diamond-Like Carbon (DLC) Films with Poly Alpha Olefin (PAO) Lubricant // *Tribol. Online*. — 2008 (3), no. 5, 310—315
  10. **Zapid R., Zapid R., Masjuki H.H., Varman H., Mufti K.A., Kasam M.A., and Guslar M.** Effect of Lubricant Formulation on the Tribological Performance of Self-Mated Dropped DLC Contacts. A Review // *Tribol. Letter*. — 2015 (58), no. 2, 1—28
  11. **Buyanovskii I.A., Khrushchov M.M., and Samusenko V.D.** Tribological Behavior of Diamond-Like Carbon Coatings under Boundary Friction. Part I. Structure, Testing methods. Lubrication by Adsorption Layers. Part II. Lubrication with Chemical Modified Layers // *Inorganic Materials: Applied Research*. — 2021 (13), no. 4, 893—913
  12. **Semenov A.P.** Tribological Properties and Vacuum Ion-Plasma Methods of Application of Diamond and Diamond-Like Coatings // *Journal of Friction and Wear*. — 2009 (30), no. 1, 62—75
  13. **Antifriction coating:** patent of the Russian Federation for an invention. RU 2528449 C1. 07.29.2020. / A.Yu. Albagachiev, I.A. Buyanovskiy, V.A. Levchenko, V.D. Samusenko (in Russian)
  14. **Topolyansky P.A., Topolyansky A.P., Ermakov S.A., Kanaev A.T., Biyzhanov S.K., Sarsembayeva T.E.** Certification of materials and coatings by physical and mechanical characteristics of the surface layer // *Bulletin of modern studies*. — Omsk: NC “Orka”. — 2018, no. 10-1 (25), 354—366 (in Russian)
  15. **Avdyukhina V.M., Khrushchov M.M., Sulyandziga D.A., Levin I. S.** X-ray Diffraction Studies of the Effect of Phase Composition and Structural State Characteristics on the Tribological Behavior of the Molybdenum- and Tungsten-Based Strengthening Coatings // *Crystallography Reports*. — 2023 (68), no. 3, 468—477

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)