

УДК 621.89.017

## Алмазоподобные покрытия для узлов трения космических изделий

М.А. Броновец

Федеральное Государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук»,  
Проспект Вернадского, д. 101, корп. 1, г. Москва 119526, Россия

Поступила в редакцию 02.05.2024.

После доработки 08.08.2024.

Принята к публикации 12.08.2024.

При разработке материалов для подвижных сопряжений и узлов трения, работающих в открытом космическом пространстве, особое значение имеет износостойкость пар трения при коэффициентах трения от 0,05 до 0,1. Величины коэффициентов трения определяют нагрев сопряжений и мощности приводов. Износостойкость регламентирует сроки службы узлов трения. Выбор алмазоподобных покрытий в качестве одного из элементов пары трения определяет высокую износостойкость сопряжения при работе с твёрдосмазочными покрытиями вследствие высокой их химической инертности и отсутствия переноса вещества с твёрдосмазочного покрытия на алмазоподобное покрытие. В настоящей работе приведены результаты испытаний алмазоподобных покрытий при трении по твёрдосмазочному покрытию ЭОНИТ-3 и испытаниях на воздухе и в вакууме до  $10^{-6}$  мм. рт. ст. по схеме вал—втулка в диапазоне температур от  $-50$  °С до  $+50$  °С. Алмазоподобное монокристаллическое покрытие толщиной 20 мкм наносилось на вал из закалённой стали ШХ-15; покрытие ЭОНИТ-3 толщиной 15 мкм нанесено на стальную втулку. Испытания проводились при нормальной нагрузке 100 Н; частота вращения вала — 200 об/мин; скорость скольжения — 0,12 м/с; продолжительность испытаний 1 час. Измерялись коэффициенты трения и износ твёрдосмазочного покрытия. Износ алмазоподобных покрытий не обнаружен. Износ твёрдосмазочного покрытия составлял от  $1,065 \cdot 10^{-8}$  мм<sup>3</sup>/м до  $3,195 \cdot 10^{-8}$  мм<sup>3</sup>/м при температурах от  $-50$  °С до  $+50$  °С на воздухе и в вакууме  $10^{-6}$  мм. рт. ст.

**Ключевые слова:** алмазоподобные покрытия, твердые смазочные покрытия, коэффициент трения, износостойкость, низкие температуры, высокие температуры, открытый космос, вакуум.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-4-343-349

---

**Адрес для переписки:**

М.А. Броновец  
Федеральное Государственное бюджетное учреждение науки  
«Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук»,  
Проспект Вернадского, д. 101, корп. 1, г. Москва 119526, Россия  
e-mail: brnovets@ipmnet.ru

**Address for correspondence:**

M.A. Bronovets  
Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy  
of Sciences,  
Prospect Vernadskogo, 101, building 1, Moscow 119526, Russia  
e-mail: brnovets@ipmnet.ru

---

**Для цитирования:**

М.А. Броновец.  
Алмазоподобные покрытия для узлов трения космических изделий.  
Трение и износ.  
2024. — Т. 45, № 4. — С. 343–349.  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-4-343-349

**For citation:**

M.A. Bronovets.  
[Diamond-Like Coatings for Friction Units of Space Applications].  
Trenie i Iznos.  
2024, vol. 45, no. 4, pp. 343–349 (in Russian).  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-4-343-349

# Diamond-Like Coatings for Friction Units of Space Applications

M.A. Bronovets

*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences,  
Prospect Vernadskogo, 101, building 1, Moscow 119526, Russia*

*Received 02.05.2024.*

*Revised 08.08.2024.*

*Accepted 12.08.2024.*

## Abstract

When developing materials for moving joints and friction units operating in outer space, the wear resistance of friction pairs with friction coefficients from 0.05 to 0.1 is of particular importance. The values of the friction coefficients determine the heating of the interfaces and the power of the drives. Wear resistance regulates the service life of friction units. The choice of diamond-like coatings as one of the elements of the friction pair determines the high wear resistance of the interface when working with solid lubricant coatings due to their high chemical inertness and the absence of substance transfer from the solid lubricating coating to the diamond-like coating. This paper presents the results of testing diamond-like coatings during friction on the solid lubricant coating EONIT-3 and tests in air and vacuum up to  $10^{-6}$  mm Hg. according to the shaft-bushing scheme in the temperature range from  $-50$  °C to  $+50$  °C. A diamond-like single-crystalline coating 20 microns thick was applied to a shaft made of hardened steel ShKh-15; EONIT-3 coating with a thickness of 15 microns is applied to a steel bushing. Tests were carried out under a normal load of 100 N; shaft rotation speed — 200 rpm; sliding speed — 0.12 m/s; test duration 1 hour. The friction coefficients and wear of the solid lubricant coating were measured. No wear of the diamond-like coatings was detected. The wear of the solid lubricant coating ranged from  $1.065 \cdot 10^{-8}$  mm<sup>3</sup>/m to  $3.195 \cdot 10^{-8}$  mm<sup>3</sup>/m at temperatures from  $-50$  °C to  $+50$  °C in air and in a vacuum of  $10^{-6}$  mm Hg.

**Keywords:** diamond-like coatings, solid lubricating coatings, friction coefficient, wear resistance, low temperatures, high temperatures, open space, vacuum.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-4-343-349

---

### Адрес для переписки:

М.А. Броновец  
Федеральное Государственное бюджетное учреждение науки  
«Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской  
академии наук»,  
Проспект Вернадского, д. 101, корп. 1, г. Москва 119526, Россия  
e-mail: brnovets@ipmnet.ru

### Address for correspondence:

M.A. Bronovets  
Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy  
of Sciences,  
Prospect Vernadskogo, 101, building 1, Moscow 119526, Russia  
e-mail: brnovets@ipmnet.ru

---

### Для цитирования:

М.А. Броновец.  
Алмазоподобные покрытия для узлов трения космических  
изделий.  
Трение и износ.  
2024. — Т. 45, № 4. — С. 343–349.  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-4-343-349

### For citation:

M.A. Bronovets.  
[Diamond-Like Coatings for Friction Units of Space Applications].  
*Trenie i Iznos*.  
2024, vol. 45, no. 4, pp. 343–349 (in Russian).  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-4-343-349

## Список использованных источников

1. **Броновец М.А.** Покрытия триботехнического назначения для открытого космоса // Трение и износ. — 2023 (44), № 6, 544—550
2. **Броновец М.А.** Триботехнические характеристики твёрдых смазочных покрытий // Трение и износ. — 2023 (44), № 4, 335—342
3. **Дерягин Б.В., Спицын Б.В.** Химическая кристаллизация алмаза // Рост кристаллов. — Ереван: Ереванский госуниверситет. — 1977 (12), 28—32
4. **Spitsyn B.V., Bouilov L.L., and Deryaguin B.V.** Vapor Growth of Diamond on Diamond and Other Surfaces // Crystal Growth. — 1981 (52), 219—221
5. **Donnet C. and Erdemir A.** Diamond-Like Carbon Films: A Historical Overview // Tribology of Diamond Like Carbon Films. Fundamentals and Applications / ed. by C. Donnet and A. Erdemir. — NY: Springer. — 2008, 1—13
6. **Bewilogua K. and Hofmann D.** History of Diamond-Like Carbon Films – from First Experiments to Worldwide Applications // Surface and Coatings Technology. — 2014 (242), 214—225
7. **Tyagi Ankit, Walia R.S., Murtaza Qasim, et al.** A Critical Review of Diamond Like Carbon Coating for Wear Resistance Applications // International Journal of Refractory Metals&Hard Materials. — 2019 (78), 107—122
8. **Georgakilas V., Perman J.A., Tucek J., and Zboril R.** Broad Family of Carbon Nanoallotropes: Classification, Chemistry and Applications of Fullerenes, Carbon Dots, Nanotubes, Graphene, Nanodiamonds and Combined Superstructures // Chemical Reviews. — 2015 (115), no. 11, 4744—4822
9. **Vetter J.** 60 Years of DLC Coatings: Historical Highlights and Technical Review of Cathodic Arc Processes to Synthesize Various DLC Types, and Their Evolution for Industrial Applications // Surface and Coatings Technology. — 2014 (257), 213—240
10. **Gayathri S., Kumar N., Krishnan R., Ravindran T.R., Amirthapandian S., Dash S., Tyagi A.K., and Sridharan M.** Influence of Transition Metal Doping on the Tribological Properties of Pulsed Laser Deposited DLC Films // Ceramics International. — 2015 (41), no. 1, Part B, 1797—1805
11. **Erdemir A. and Fryilmaz O.** On the Intrinsic and Extrinsic Hydrogen Lubrication Mechanism of Various Carbon Films: An Imaging TOF-SIMS Study // World Tribology Congress 2009. Kyoto, Japan, September 6-11. — 2009, 431, K-223
12. **Левченко В.А., Буяновский И.А., Самуценко В.Д.** Исследование алмазоподобного монокристаллического углеродного покрытия для триботехнического применения // Трение и износ. — 2021 (42), № 6, 725—732
13. **Шкалей И.В., Муравьёва Т.И., Мезрин А.М., Торская Е.В.** Связь морфологии и химического состава поверхности легированных

алмазоподобных покрытий с коэффициентом трения // Трение и износ. — 2021 (42), № 6, 670—680

## References

1. **Bronovets M.A.** Tribologicheskie pokrytiya dlya otkrytogo kosmosa // Friction and Wear. — 2023 (44), no. 6, 544—550 (in Russian)
2. **Bronovets M.A.** Tribotechnicheskie charakteristiki tverdykh smasochnykh pokrytii // Friction and Wear. — 2023 (44), no. 4, 335—341 (in Russian)
3. **Deryaguin B.V. Spitsyn B.V.** Khimicheskaya kristallizatsiya Almaza // Rost kristallov. Erevan: Erevansky gosuniversitet. — 1977 (12), 28—32 (in Russian)
4. **Spitsyn B.V., Bouilov L.L., and Deryaguin B.V.** Vapor Growth of Diamond on Diamond and Other Surfaces // Crystal Growth. — 1981 (52), 219—221
5. **Donnet C. and Erdemir A.** Diamond-Like Carbon Films: A Historical Overview // Tribology of Diamond Like Carbon Films. Fundamentals and Applications / ed. by C. Donnet and A. Erdemir. — NY: Springer. — 2008, 1—13
6. **Bewilogua K. and Hofmann D.** History of Diamond-Like Carbon Films – from First Experiments to Worldwide Applications // Surface and Coatings Technology. — 2014 (242), 214—225
7. **Tyagi Ankit, Walia R.S., Murtaza Qasim, et al.** A Critical Review of Diamond Like Carbon Coating for Wear Resistance Applications // International Journal of Refractory Metals&Hard Materials. — 2019 (78), 107—122
8. **Georgakilas V., Perman J.A., Tucek J., and Zboril R.** Broad Family of Carbon Nanoallotropes: Classification, Chemistry and Applications of Fullerenes, Carbon Dots, Nanotubes, Graphene, Nanodiamonds and Combined Superstructures // Chemical Reviews. — 2015 (115), no. 11, 4744—4822
9. **Vetter J.** 60 Years of DLC Coatings: Historical Highlights and Technical Review of Cathodic Arc Processes to Synthesize Various DLC Types, and Their Evolution for Industrial Applications // Surface and Coatings Technology. — 2014 (257), 213—240
10. **Gayathri S., Kumar N., Krishnan R., Ravindran T.R., Amirthapandian S., Dash S., Tyagi A.K., and Sridharan M.** Influence of Transition Metal Doping on the Tribological Properties of Pulsed Laser Deposited DLC Films // Ceramics International. — 2015 (41), no. 1, Part B, 1797—1805
11. **Erdemir A. and Fryilmaz O.** On the Intrinsic and Extrinsic Hydrogen Lubrication Mechanism of Various Carbon Films: An Imaging TOF-SIMS Study // World Tribology Congress 2009. Kyoto, Japan, September 6-11. — 2009, 431, K-223
12. **Levchenko V.A., Buyanovskii I.A., Samyzenko V.D.** Issledovanie almasopodobnogo monokristallicheskogo uglerodnogo pokrytiya dlya

- tribologicheskogo primeneniya // Friction and Wear.  
— 2021 (42), no. 6, 670—680 (in Russian)
13. **Shkalei I.V., Muravyeva T.I., Mezrin A.M.**  
Svyaz' morfologii I chimicheskogo sostava

poverkhnosty legirovannykh almasopodobnykh  
pokrytii s koeffitsientom treniya // Friction and  
Wear. — 2021 (42), no. 6, 670—680

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)