УДК 621.891:539.2

Исследование алмазоподобного монокристаллического углеродного покрытия для трибологического применения

В.А. Левченко¹, И.А. Буяновский², В.Д. Самусенко²

¹Институт перспективных покрытий и материалов университета Тайчжоу,
г. Тайчжоу 318000, Китай

²Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук,
Малый Харитоньевский переулок, д. 4, г. Москва 101990, Россия

Поступила в редакцию 02.08.2021.

После доработки 10.12.2021.

Принята к публикации 13.12.2021.

На тройной фазовой диаграмме $\text{Sp}^1\text{Sp}^2\text{Sp}^3$ установлена область возможного существования монокристаллического углерода, который имеет гомеотропно ориентированную двумерно-упорядоченную структуру с Sp^1Sp^3 типом гибридизации. Применение монокристаллического углерода в качестве покрытия рабочих поверхностей тяжело нагруженных узлов трения обеспечивает организацию на поверхностях трения высокоупорядоченного гомеотропно ориентированного слоя молекул смазочной среды. Углеродные покрытия-ориентанты с монокристаллической структурой толщиной от 0,1 мкм были получены методом импульсной конденсации углеродной плазмы в сочетании с дополнительным облучением ионами Ag^+ . Методом РФЭС показано, что в составе монокристаллического углерода кроме Sp^1 -фазы, также присутствует Sp^3 -фаза. Трибологическими исследованиями установлено, что при комнатной температуре при трении в среде инертного вазелинового масла для пары трения сталь—сталь коэффициент трения составлял 0,18, для пары трения сталь — покрытие аморфным углеродом, коэффициент трения составлял 0,21, а для пары трения сталь — покрытие монокристаллическим углеродом, коэффициент трения составлял 0,1. При этих же условиях коэффициент трения в смазочной среде того же масла, но с присадкой 1,0 мас. % олеиновой кислоты составлял 0,12. При более высоких температурах разница между значениями коэффициентов трения для этих трибосопряжений была ещё более разительна в пользу монокристаллического покрытия. Анализ всей совокупности полученных данных позволил выполнить локализацию монокристаллического углерода на тройной диаграмме для оценки возможных областей существования алмазоподобных фаз. Показана возможность использования отношения типов гибридизованных состояний Sp^3/Sp^1 в качестве критерия выбора оптимального режима синтеза монокристаллических покрытий-ориентантов.

Ключевые слова: монокристаллический углерод, антифрикционное покрытие, $\text{Sp}^1\text{Sp}^2\text{Sp}^3$ -гибридизация, граничный слой, гомеотропная ориентация, смазочные свойства масел.

DOI: 10.32864/0202-4977-2021-42-6-725-732

Адрес для переписки:

В.А. Левченко
Институт перспективных покрытий и материалов
университета Тайчжоу,
Тайчжоу 318000, Китай
e-mail: vladlev@yahoo.com

Address for correspondence:

V.A. Levchenko
Institute of Advanced Coating and Materials, Taizhou University,
Taizhou 318000, China
e-mail: vladlev@yahoo.com

Для цитирования:

В.А. Левченко, И.А. Буяновский, В.Д. Самусенко.
Исследование алмазоподобного монокристаллического
углеродного покрытия для трибологического применения.
Трение и износ.
2021. — Т. 42, № 6. — С. 725—732.
DOI: 10.32864/0202-4977-2021-42-6-725-732

For citation:

V.A. Levchenko, I.A. Buyanovskii, and V.D. Samusenko.
[Diamond-Like Coating with Monocrystalline Carbon as a Hydrogen-Free Coating for Tribological Purpose].
Trenie i Iznos.
2021, vol. 42, no. 6, pp. 725—732 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2021-42-6-725-732

Diamond-Like Coating with Monocrystalline Carbon as a Hydrogen-Free Coating for Tribological Purpose

V.A. Levchenko¹, I.A. Buyanovskii², and V.D. Samusenko²

¹*Institute of Advanced Coating and Materials of Taizhou University, Taizhou 318000, China*

²*A.A. Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of Russian Academy of Sciences M. Kharitonyevskiy Pereulok, 4, Moscow 101990, Russia*

Received 02.08.2021.

Revised 13.12.2021.

Accepted 13.12.2021.

Abstract

On the $Sp^1Sp^2Sp^3$ ternary phase diagram, the region of possible existence of monocrystalline carbon is established, which has a homeotropically oriented two-dimensionally ordered structure with the Sp^1Sp^3 hybridization type. The use of monocrystalline carbon as a coating of the working surfaces of heavily loaded friction units ensures the organization on the friction surfaces of a highly ordered homeotropically oriented layer of lubricating medium molecules. Carbon coatings-orientants with a monocrystalline structure with a thickness of 0.1 μm or more were obtained by the method of pulsed condensation of carbon plasma in combination with additional irradiation with Ar^+ ions. By tribological researches it is established that at room temperature with friction in an inactive vaseline oil for a steel—steel friction pair, the friction coefficient was 0.18, for a steel friction pair — coated with amorphous carbon, the friction coefficient was 0.21, and for friction pairs steel — coating with monocrystalline carbon, the coefficient of friction was 0.1. Under the same conditions, the coefficient of friction in the lubricating medium of the same oil, but with an additive of 1.0 % by weight of oleic acid, was 0.12. At higher temperatures, the difference between the values of the coefficients of friction for these tribo-conjugation was even more striking in favor of a monocrystalline coatings-orientants. Analysis of the entire set of data obtained made it possible to localize monocrystalline carbon on a ternary phase diagram to assess the possible regions of existence of diamond-like phases. The possibility of using the ratio of types of hybridized states Sp^3/Sp^1 as a criterion for choosing the optimal mode for the synthesis of monocrystalline coatings-orientants is shown.

Keywords: monocrystalline carbon, antifriction coating, $Sp^1Sp^2Sp^3$ -hybridization, boundary layer, homeotropic orientation.

DOI: 10.32864/0202-4977-2021-42-6-725-732

Адрес для переписки:

В.А. Левченко
Институт перспективных покрытий и материалов
университета Тайчжоу,
Тайчжоу 318000, Китай
e-mail: vladlev@yahoo.com

Address for correspondence:

V.A. Levchenko
Institute of Advanced Coating and Materials, Taizhou University,
Taizhou 318000, China
e-mail: vladlev@yahoo.com

Для цитирования:

В.А. Левченко, И.А. Буяновский, В.Д. Самусенко.
Исследование алмазоподобного монокристаллического
углеродного покрытия для трибологического применения.
Трение и износ.
2021. — Т. 42, № 6. — С. 725—732.
DOI: 10.32864/0202-4977-2021-42-6-725-732

For citation:

V.A. Levchenko, I.A. Buyanovskii, and V.D. Samusenko.
[Diamond-Like Coating with Monocrystalline Carbon as a Hydrogen-
Free Coating for Tribological Purpose].
Trenie i Iznos.
2021, vol. 42, no. 6, pp. 725—732 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2021-42-6-725-732

Список использованных источников

1. **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
2. **Erdemir A. and Donnet C.** Tribology of Diamond-Like Carbon Films: Recent Progress and Future Prospects // *Journal of Physics D: Applied Physics*. — 2006 (**39**), no. 18, R311
3. **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
4. **Семёнов А.П.** Трибологические свойства и вакуумно-плазменные методы получения алмазных и алмазоподобных покрытий // *Трение и износ*. — 2009 (**30**), № 1, 83—102
5. **Ferrari A.C.** Nondestructive Characterization of Carbon Films // In: *Tribology of Diamond Like Carbon Films. Fundamentals and Applications* / ed. by Donnet C. and Erdemir A. — NY: Springer. — 2008, 23—85
6. **Robertson J.** Classification of Diamond-Like Carbons // In: *Tribology of Diamond-Like Films. Fundamentals and Applications* / ed. by C. Donnet, A. Erdemir. — NY: Springer Science Business Media, LLC. — 2008, 13—23
7. **Левченко В.А., Гусева М.Б., Бабаев В.Г., Новиков Н.Д., Матвеев В.Н.** Взаимодействие эпитропных жидких кристаллов с поверхностью линейно-цепочечного углерода // *Поверхность*. — 2005, № 10, 52—59
8. **Kudryavtsev Yu.P., Evsyukov S.E., Babaev V.G., Guseva M.B., Khvostov V.V., and Krechko L.M.** Oriented Carbyne Layers // *Carbon*. — 1992 (**30**), 213—221
9. **Levchenko V.A., Buyanovskii I.A., and Matveenko V.N.** To the New Concept of Green Tribology // *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*. — 2017 (**5**), no. 1, 175—187
10. **Буяновский И.А., Дроздов Ю.Н., Игнатьева З.В., Левченко В.А., Матвеев В.Н.** Углеродные покрытия-ориентанты и эффективность смазочного действия масел // *Механизация строительства*. — 2013, № 6, 41—44
11. **Беленков В.А., Ивановская В.В., Ивановский А.Л.** Наноалмазы и родственные углеродные наноматериалы. — Екатеринбург. — 2008
12. **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
13. **Heimann R.B., Evsyukov S.E., and Koga Y.** Carbon Allotropes: A Suggested Classification Scheme

Based on Valence Orbital Hybridization // *Carbon*. — New York, NY. — 1997 (**35**), nos. 10—11, 1654—1658

References

1. **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
2. **Erdemir A. and Donnet C.** Tribology of Diamond-Like Carbon Films: Recent Progress and Future Prospects // *Journal of Physics D: Applied Physics*. — 2006 (**39**), no. 18, R311
3. **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
4. **Semyonov A.P.** Tribologicheskie svoystva i vakuumno-plasmennye a metody polucheniyaalmaznyh Ialmazopodobnyh pokrytiy // *Trenie I Iznos*. — 2009 (**30**), no. 1, 83—102 (in Russian)
5. **Ferrari A.C.** Nondestructive Characterization of Carbon Films // In: *Tribology of Diamond Like Carbon Films. Fundamentals and Applications* / ed. by Donnet C. and Erdemir A. — NY: Springer. — 2008, 23—85
6. **Robertson J.** Classification of Diamond-Like Carbons // In: *Tribology of Diamond-Like Films. Fundamentals and Applications* / ed. by C. Donnet, A. Erdemir. — NY: Springer Science Business Media, LLC. — 2008, 13—23
7. **Levchenko V.A., Guseva M.B., Babaev V.G., Novikov N.D., Matveenko V.N.** Vsaimodeystvie epitroynykh zhidkiy kistallov s poverhnost' u lineyno-zepochechnogo ugleroda // *Poverhnost*. — 2005, no. 10, 52—59 (in Russian)
8. **Kudryavtsev Yu.P., Evsyukov S.E., Babaev V.G., Guseva M.B., Khvostov V.V., and Krechko L.M.** Oriented Carbyne Layers // *Carbon*. — 1992 (**30**), 213—221
9. **Levchenko V.A., Buyanovskii I.A., and Matveenko V.N.** To the New Concept of Green Tribology // *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*. — 2017 (**5**), no. 1, 175—187
10. **Buyanovskii I.A., Drozdov Yu N., Ignatieva Z.V., Levchenko V.A., Matveenko V.N.** Uglernodnye pokrytiya — orientaty i effektivnost' smazochno deystviya masel // *Mehanizatsiya stroitel'stva*. — 2013, no. 6, 41—44 (in Russian)
11. **Belenkov V.A., Ivanovskaya V.V., Ivanovskiy A.L.** Nanoalmazy I rodstvnyye uglernodnye nanomaterials. — Yekaterinburg. — 2008 (in Russian)
12. **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
13. **Heimann R.B., Evsyukov S.E., and Koga Y.** Carbon Allotropes: A Suggested Classification Scheme

Based on Valence Orbital Hybridization // Carbon. — New York, NY. — 1997 (**35**), nos. 10—11, 1654—1658

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