

УДК 621.793: 539.23

Хромуглеродные покрытия с различным типом нанокompозитной структуры, полученные магнетронным распылением, и их свойства*

М.М. Хрущов

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,
Малый Харитоньевский пер., д. 4, г. Москва 101990, Россия

Поступила в редакцию 21.04.2021.

После доработки 20.02.2022.

Принята к публикации 21.02.2022.

Проведено сравнительное изучение и оценка влияния особенностей структурно-фазового состояния двух типов нанокompозитных хромуглеродных покрытий на функциональные свойства (коэффициент трения, длительность стабильной работы фрикционного контакта с покрытием в условиях высоких контактных давлений, механические свойства, адгезионная прочность). Исследовали легированные хромом алмазоподобные покрытия, полученные реактивным магнетронным распылением хромовых мишеней в смеси ацетилена и азота, и покрытия, напылённые магнетронным (нерактивным) распылением мишеней на основе хрома и детонационных наноалмазов. Показано, что особенности нанокompозитной структуры подобных покрытий могут существенно влиять на поведение их трибологических и микромеханических свойств. При проведении испытаний на адгезионную прочность методом инструментального (измерительного) царапания установлен многостадийный характер процесса разрушения покрытий при царапании с увеличивающейся нагрузкой на движущийся алмазный индентор. Установлены типы возникающих при этом структурных повреждений, их связь со структурно-фазовым состоянием покрытий и пороговые (критические) нагрузки, при которых характер разрушения меняется. Показано наличие корреляции между содержанием углерода в хромуглеродных покрытиях, их работоспособностью в условиях тяжелонагруженного фрикционного контакта и характеристиками адгезионной прочности. Результаты показывают, что свойства хромуглеродных нанокompозитных покрытий можно контролировать, меняя их микроструктуру и структурно-фазовое состояние путем подбора параметров процесса вакуумного ионно-плазменного напыления.

Ключевые слова: твёрдые хромуглеродные покрытия, магнетронное распыление, алмазоподобный углерод, наноалмазы, свободный углерод, карбиды и нитриды хрома, нанокompозитная структура, трение, адгезионная прочность.

DOI: 10.32864/0202-4977-2022-43-1-59-76

Адрес для переписки:

М.М. Хрущов
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,
Малый Харитоньевский пер., д. 4, г. Москва 101990, Россия
e-mail: michel_x@mail.ru

Address for correspondence:

M.M. Khrushchov
A.A. Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute, Russian
Academy of Sciences,
Maly Kharitonyevskiy lane, 4, Moscow 101990, Russia
e-mail: michel_x@mail.ru

Для цитирования:

М.М. Хрущов.
Хромуглеродные покрытия с различным типом нанокompозитной структуры, полученные магнетронным распылением, и их свойства.

Трение и износ.
2022. — Т. 43, № 1. — С. 59–76.

DOI: 10.32864/0202-4977-2022-43-1-59-76

For citation:

M.M. Khrushchov.
[Chromium-Carbon-Based Coatings with Different Types of Nanocomposite Structure Obtained by Magnetron Sputtering and Their Properties].

Trenie i Iznos.
2022, vol. 43, no. 1, pp. 59–76 (in Russian).

DOI: 10.32864/0202-4977-2022-43-1-59-76

* По материалам доклада на Международной научно-технической конференции «Полимерные композиты и трибология» (Поликомтриб-2019), г. Гомель, Беларусь, 25—28 июня 2019 г.

Chromium-Carbon-Based Coatings with Different Types of Nanocomposite Structure Obtained by Magnetron Sputtering and Their Properties

M.M. Khrushchov

A.A. Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute, Russian Academy of Sciences,
Maly Kharitonyevskiy lane, 4, Moscow 101990, Russia

Received 21.04.2021.

Revised 20.02.2022.

Accepted 21.02.2022.

Abstract

The comparative investigation has been performed to estimate the influence of structural state and phase composition on the functional properties (coefficient of friction, durability of the coated frictional contact period of stable work at high contact pressures, mechanical properties and adhesive strength) of two types of chrome-carbon coatings: the chromium-alloyed diamond-like carbon (Cr-DLC) coatings obtained by reactive magnetron sputtering of chromium in acetylene-nitrogen gas mixtures, and the coatings deposited by non-reactive magnetron sputtering of targets made of chromium and detonation nanodiamonds (ND). It has been demonstrated that the peculiarities of the nanocomposite structure of these coatings can significantly affect their tribological and micromechanical behavior. The adhesive strength investigations by the method of instrumented scratching with increasing load on a moving diamond indenter have proved the multi-stage character of the process of coating failure. The existing types of surface damage, their relationship with the structural state and phase composition of coatings, and the threshold (critical) loads at which the character of coating failure changes have been established. It has been shown that there exists a correlation between the content of carbon in chrome-carbon coatings, the tribological performance under the conditions of a heavily-loaded frictional contact and their adhesive strength characteristics. These results mean that the tribological and other functional properties behavior of chrome-carbon coatings with nanocomposite structure might be controlled by tailoring their microstructural state and phase composition by selection of the appropriate technological parameters of their plasma-assisted vacuum deposition.

Keywords: hard carbon coatings alloyed with chromium, magnetron sputtering, diamond-like carbon, nanodiamonds, free carbon, chromium carbide and nitride phases, nanocomposite structures, friction, adhesive strength.

DOI: 10.32864/0202-4977-2022-43-1-59-76

Адрес для переписки:

М.М. Хрущов
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН,
Малый Харитоньевский пер., д. 4, г. Москва 101990, Россия
e-mail: michel_x@mail.ru

Address for correspondence:

M.M. Khrushchov
A.A. Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute, Russian
Academy of Sciences,
Maly Kharitonyevskiy lane, 4, Moscow 101990, Russia
e-mail: michel_x@mail.ru

Для цитирования:

М.М. Хрущов.
Хромуглеродные покрытия с различным типом нанокompозитной
структуры, полученные магнетронным распылением, и их
свойства.

Трение и износ.
2022. – Т. 43, № 1. – С. 59–76.

DOI: 10.32864/0202-4977-2022-43-1-59-76

For citation:

M.M. Khrushchov.
[Chromium-Carbon-Based Coatings with Different Types of
Nanocomposite Structure Obtained by Magnetron Sputtering and Their
Properties].

Trenie i Iznos.
2022, vol. 43, no. 1, pp. 59–76 (in Russian).

DOI: 10.32864/0202-4977-2022-43-1-59-76

Список использованных источников

1. Семенов А.П., Ковш И.Б., Петрова И.М. и др. Методы и средства упрочнения поверхностей деталей машин концентрированными потоками энергии / под ред. А.П. Гусенкова. — М.: Наука. — 1992
2. Семенов А.П. Трибологические свойства при высоких температурах тугоплавких оксидов и неметаллических соединений. Часть 1: Оксиды // Трение и износ. — 2008 (29), № 5, 531—549
3. Семенов А.П. Трибологические свойства при высоких температурах тугоплавких оксидов и неметаллических соединений. Часть 2: Неметаллические соединения // Трение и износ. — 2008 (29), № 6, 654—667
4. Семенов А.П. Трибологические свойства и вакуумные ионно-плазменные методы получения алмазных и алмазоподобных покрытий // Трение и износ. — 2009 (30), № 1, 83—102
5. Semenov A.P. and Khrushchov M.M. Tribological Coatings with a Chromium-Based Composite Structure Obtained by Reactive Deposition in Vacuum // J. Surf. Invest.: X-Ray +. — 2014 (8), № 5, 901—911
6. Хрущов М.М., Атаманов М.В., Марченко Е.А., Петржик М.И., Левин И.С. Алмазоподобные нанокompозитные покрытия a -C:H:Cr — структурное состояние, механические и трибологические свойства // Изв. РАН: Сер. физич. — 2014 (78), 1257—1265
7. Хрущов М.М., Атаманов М.В., Шевченко Н.В., Марченко Е.А., Левин И.С., Петржик М.И., Мирошниченко В.И., Антонова О.С., Рэйляну М.Д. Хромуглеродные покрытия на основе хрома и детонационных наноалмазов: Получение методом магнетронного распыления, особенности фазового состава и трибологические свойства // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2018, № 2, 44—53
8. Khrushchov M.M., Avdyukhina V.M., and Levin I.S. The X-ray Method of Structure and Phase Composition Characterization of Nanocomposite Coatings: Hard Carbon-Based Coatings Alloyed with Metals // J. Phys.: Conf. Ser. — 2019 (1313), 012029
9. Комбалов В.С. Методы и средства испытаний на трение и износ конструкционных и смазочных материалов: Справочник. — М.: Машиностроение. — 2008
10. Gassner G., Patscheider J., Mayrhofer P.H., Hagedus E., Toth L., Kovacs I., Pécz B., Srot V., Sheu C., and Mitterer C. Structure of Sputtered Nanocomposite CrC_x/a -C:H Thin Films // J. Vac. Sci. Technol. B. — 2006 (24), no. 4, 1837—1843
11. Хрущов М.М., Марченко Е.А., Левин И.С., Авдюхина В.М., Рэйляну М.Д., Образцова Е.А., Атаманов М.В. Особенности структуры и трибологическое поведение хромуглеродных покрытий, полученных магнетронным распылением // Физ. мет. металловед. — 2019 (120), № 2, 219—224
12. Robertson J. Diamond-Like Amorphous Carbon // Mater. Sci. Eng. R: Reports. — 2002 (37), 129—281
13. Хрущов М.М., Марченко Е.А., Левин И.С., Авдюхина В.М., Рэйляну М.Д., Шевченко Н.В., Образцова Е.А. Структура и функциональные свойства покрытий, полученных распылением мишеней на основе хрома и наноалмазов детонационного синтеза // Металлы. — 2020, № 4, 85—92
14. Свойства элементов: Ч. 1: Физические свойства: Справочник / под ред. Г.В. Самсонова. — М: Металлургия. — 1976
15. Джонсон К.Л. Механика контактного взаимодействия. — М.: Мир. — 1989
16. Khrushchov M.M., Marchenko E.A., Petrzik M.I., Atamanov M.V., and Antonova O.S. The Effect of Structure on Tribological behavior of Chromium-Carbon Coatings Obtained by Plasma-Assisted Physical Vapor Deposition // J. Phys.: Conf. Series. — 2018 (1121), 012017
17. Bull S.J. Failure Mode Maps in the Thin Film Adhesion Test // Tribology Intern. — 1997 (30), 491—498
18. Chen Z. and Wu L.Y.L. Scratch Resistance of Protective Sol-Gel Coatings on Polymeric Substrates // Tribology of Polymeric Nanocomposites: Friction and Wear of Bulk Materials and Coatings / ed. by K. Friedrich, A.K. Schlarb. — Amsterdam: Elsevier. — 2008, 325—353
19. ASTM Standard C1624–05. Standard Test Method for Adhesion Strength and Mechanical Failure Modes of Ceramic Coatings by Quantitative Single Point Scratch Testing. — Reapproved 2010. — West Conshohocken (PA): ASTM Intern. — 2011
20. Селиванов К.С., Смыслов А.М., Петухов А.Н. Исследования свойств вакуумно-плазменных покрытий методом склерометрирования на установке CSM Scratch Test // Вестник УГАТУ. — 2011 (15), № 4, 230—236
21. Погребняк А.Д., Береснев В.М., Ильяшенко М.В., Каверина А.Ш., Якущенко И.В., Плотников С.В. Структура, морфология и физико-механические свойства нано- и микро-структурных покрытий из Al_2O_3 и ZrO_2 // Физика и химия обработки материалов. — 2012, № 5, 59—65
22. Блинков И.В., Белов Д.С., Волхонский А.О., Пустов Ю.А., Кирюханцев-Корнеев Ф.В., Аникин В.Н., Сергеевич В.С., Кучина И.Ю. Термическая стабильность, жаростойкость, электрохимическое поведение и адгезионная прочность с основной наноструктурных покрытий (Ti, Al)N–Ni // Физикохимия поверхности и защита материалов. — 2016 (52), № 1, 80—88
23. Кирюханцев-Корнеев Ф.В., Швейко 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
24. Кузнецова Т.А. Особенности разрушения при трении и адгезионная прочность комбинированных многослойных покрытий на основе Ti и ZrHf на стали Р6М5 // Трение и износ. — 2006 (27), № 1, 69—77
 25. Steinmann P.A., Tardy Y., and Hintermann H.E. Adhesion Testing by the Scratch Test Method: the Influence of Intrinsic and Extrinsic Parameters on the Critical Load // Thin Solid Films. — 1987 (154), 333—349
 26. Кузнецова Т.А., Андреев М.А., Маркова Л.В., Чижик С.А. Применение атомно-силовой микроскопии при определении микротвердости тонких покрытий методом склерометрии // Трение и износ. — 2007 (28), № 3, 276—281
 27. Буяновский И.А., Хрущов М.М., Самушенко В.Д., Щербаков Ю.И., Атаманов М.В., Антонова О.С. Граничная смазка фрикционных контактов сталь/сталь с Cr-DLC покрытием // Сборка в машиностроении, приборостроении. — 2020 (21), № 12, 558—563

References

1. Semenov A.P., Kovsh I.B., Petrova I.M. a.o. Metody i sredstva uprochneniya detalei mashin koncentrirovannymu potokamy energii / ed. by A.P. Gusenkov. — Moscow: Nauka. — 1992 (in Russian)
2. Semenov A.P. Tribological Properties of High-Melting Oxides and Nonmetallic Compounds at Elevated Temperatures. Part 1: Oxides // J. Frict. Wear. — 2008 (29), 392—404
3. Semenov A.P. Tribological Properties of High-Melting Oxides and Non-Metallic Compounds at Elevated Temperatures. Part 2. Non-Metallic Compounds // J. Frict. Wear. — 2008 (29), 483—492
4. Semenov A.P. Tribological Properties and Vacuum Ion-Plasma Methods of Application of Diamond and Diamond-Like Coatings // J. Frict. Wear. — 2009 (30), 62—75
5. Semenov A.P. and Khrushchov M.M. Tribological Coatings with a Chromium-Based Composite Structure Obtained by Reactive Deposition in Vacuum // J. Surf. Invest.: X-Ray +. — 2014 (8), 901—911
6. Khrushchov M.M., Atamanov M.V., Marchenko E.A., Petrzhih M.I., Levin I.S. Diamondlike Nanocomposite a-C:H:Cr Coatings: Structure, Mechanical, and Tribological Properties // Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys. — 2014 (78), 1007—1014
7. Khrushchov M.M., Atamanov M.V., Shevchenko N.V., Marchenko E.A., Levin I.S., Petrzhih M.I., Miroshnichenko V.I., Antonova O.S., and Reilyanu M.D. Chromium and Detonation Nanodiamond Based Coatings of the Chromium–Carbon System: Deposition by Magnetron Sputtering,

- Peculiarities of Phase Composition, and Tribological Properties // J. Mach. Manuf. Rel. — 2018 (47), 160—167
8. Khrushchov M.M., Avdyukhina V.M., and Levin I.S. The X-Ray Method of Structure and Phase Composition Characterization of Nanocomposite Coatings: Hard Carbon-Based Coatings Alloyed with Metals // J. Phys.: Conf. Ser. — 2019 (1313), 012029
 9. Kombalov V.S. Metody i sredstva ispytaniya na trenie i iznos konstruktivnykh i smazochnykh materialov. — Moscow: Mashinostroenie. — 2008 (in Russian)
 10. Gassner G., Patscheider J., Mayrhofer P.H., Hagedus E., Toth L., Kovacs I., Pécz B., Srot V., Sheu C., and Mitterer C. Structure of Sputtered Nanocomposite CrC_x/a-C:H Thin Films // J. Vac. Sci. Technol. B. — 2006 (24), no. 4, 1837—1843
 11. Khrushchov M.M., Marchenko E.A., Levin I.S., Avdyukhina V.M., Reilyanu M.D., Obraztsova E.A., and Atamanov M.V. Structure and Tribological behavior of Chromium–Carbon Coatings Obtained by Magnetron Sputtering // Phys. Met. Metallogr. — 2019 (120), 204—209
 12. Robertson J. Diamond-Like Amorphous Carbon // Mater. Sci. Eng. R: Reports. — 2002 (37), 129—281
 13. Khrushchov M.M., Marchenko E.A., Levin I.S., Avdyukhina V.M., Reilyanu M.D., Shevchenko N.V., and Obraztsova E.A. Structure and Functional Properties of the Coatings Deposited by Sputtering of Targets Based on Chromium and Detonation Nanodiamonds // Russ. Metal. (Metally). — 2020 (2020), 786—791
 14. Svoistva elementov: Part 1: Fizicheskie svoistva: Handbook / ed. by G.V. Samsonov. — Moscow: Metallurgiya. — 1976 (in Russian)
 15. Johnson K.L. Contact Mechanics. — Cambridge: Cambridge Univ. Press. — 1985
 16. Khrushchov M.M., Marchenko E.A., Petrzhih M.I., Atamanov M.V., and Antonova O.S. The Effect of Structure on Tribological behavior of Chromium–Carbon Coatings Obtained by Plasma-Assisted Physical Vapor Deposition // J. Phys.: Conf. Series. — 2018 (1121), 012017
 17. Bull S.J. Failure Mode Maps in the Thin Film Adhesion Test // Tribology Intern. — 1997 (30), 491—498
 18. Chen Z. and Wu L.Y.L. Scratch Resistance of Protective Sol-Gel Coatings on Polymeric Substrates // Tribology of Polymeric Nanocomposites: Friction and Wear of Bulk Materials and Coatings / ed. by K. Friedrich, A.K. Schlarb. — Amsterdam: Elsevier. — 2008, 325—353
 19. ASTM Standard C1624–05. Standard Test Method for Adhesion Strength and Mechanical Failure Modes of Ceramic Coatings by Quantitative Single Point Scratch Testing. — Reapproved 2010. — West Conshohocken (PA): ASTM Intern. — 2011
 20. Selyvanov K.S., Smyslov A.M., Petukhov A.N.

- Issledovanie svoistv vakuumno-plazmennykh pokrytiy metodom sklerometrirovaniya na ustanovke CSM Scratch Test // Vestnik UGATU. — 2011 (15), No. 4, 230—236 (in Russian)
21. **Pogrebnyak A.D., Beresnev A.D., Il'yashenko M.V., Kaverina A.Sh., Yakushenko I.V., Plotnikov S.V.** Struktura, morfologiya i fiziko-mekhanicheskiye svoistva nano- i mikrostrukturnykh pokrytiy Al_2O_3 i ZrO_2 // Fiz. Khim. Obr. Mater. — 2012, No. 5, 59—65 (in Russian)
22. **Blinkov I.V., Belov D.S., Volkhonskii A.O., Pustov Yu.A., Kiryukhantsev-Korneev Ph.V., Anikin V.N., Sergevnin V.S., and Kuchina I.Yu.** (Ti,Al)N–Ni Nanostructured Coatings: Thermal stability, Heat Resistance, Electrochemical behavior, and Adhesive Strength with a Substrate // Prot. Met. Phys. Chem. Surf. — 2016 (52), 81—88
23. **Kiryukhantsev-Korneev Ph.V., Sheveiko A.N., and Petrzhik M.I.** Approaches to Increasing the Adhesion Strength of Hard Wear-Resistant Nanostructured Coatings Based on the Ti–B–(Cr, Si, C)–N System // Prot. Met. Phys. Chem. Surf. — 2019 (55), 502—510
24. **Kuznetsova T.A.** Features of Failure at Friction and Adhesion of Combined Multilayer Coatings Based on Ti and ZrHf on Steel R6M5 // J. Frict. Wear. — 2006 (27), no. 1, 62—69
25. **Steinmann P.A., Tardy Y., and Hintermann H.E.** Adhesion Testing by the Scratch Test Method: the Influence of Intrinsic and Extrinsic Parameters on the Critical Load // Thin Solid Films. — 1987 (154), 333—349
26. **Kuznetsova T.A., Andreev M.A., Markova L.V., and Chizhik S.A.** Application of Atomic-Force Microscopy when Measuring Microhardness of Thin Coatings by Scratching // J. Frict. Wear. — 2007 (28), 279—285
27. **Buyanovskii I.A., Khrushchov M.M., Samusenko V.D., Shcherbakov Yu.I., Atamanov M.V., Antonova O.S.** Granichnaya smazka friktsionnykh kontaktov stal'/stal' s pokrytyem Cr-DLC // Sbornik Mashinostr. Priborostr. — 2020 (21), no. 12, 558—563 (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