

УДК 621.893:620.178.16

Триботехнические свойства углерод-углеродных фрикционных композитов при высоких температурах

П.О. Буковский¹, А.В. Морозов¹, В.В. Кулаков², А.К. Голубков², Н.Б. Родионов³,
А.Н. Кириченко³

¹Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН,
проспект Вернадского, д. 101, к. 1, г. Москва 119526, Россия

²ПАО Авиационная корпорация «Рубин»,
квартал Западная Промзона, шоссе Энтузиастов, д. 5, г. Балашиха 143912, Россия

³Частное учреждение «ИТЭР-Центр»,
улица Пушкиновых, д. 12, строение 104С, г. Троицк 108840, Россия

Поступила в редакцию 18.07.2022.

После доработки 17.10.2022.

Принята к публикации 18.10.2022.

Представлены результаты трибологических испытаний новых углерод-углеродных композитов на основе пековой матрицы и материала на основе пироуглеродной матрицы, которые были разработаны для авиационных многодисковых тормозов. В представленной работе углеродные композиты отличаются своей внутренней структурой, на которую влияет как технология получения углеродного волокна и степень его температурной обработки, так и множество других факторов. Длина волокон, которыми армируется матрица композита, также варьируется. Трибологические свойства определялись на лабораторном трибометре по схеме контакта кольцо—кольцо в диапазоне нормальных нагрузок 0,5—1,1 МПа и скоростей скольжения 1—4 м/с. Экспериментальное исследование проводилось согласно методике двухфакторного планированного эксперимента. С целью устранения интенсивного окисления образцов, вызванного их фрикционным разогревом, испытания проводились в среде инертного газа. Изучение фрикционной плёнки приводилось методом Рамановской спектроскопией с использованием возбуждающего зеленого лазера с длиной волны 532 нм. Были определены трибологические свойства разработанных материалов, которые демонстрируют, что температура на поверхности трения оказывает существенное влияние на коэффициент трения и интенсивность изнашивания материала. В работе установлено, что на поверхности трения образуется фрикционная плёнка, в результате формирования третьего тела, которая в свою очередь влияет на трибологические свойства пары трения. В зависимости от структуры композита и максимально достигнутой температуры на его поверхности фрикционная плёнка может преимущественно состоять как из матрицы, так и из углеродного волокна.

Ключевые слова: углеродные композиты, авиационные тормоза, фрикционная плёнка трения.

DOI: 10.32864/0202-4977-2022-43-5-491-501

Адрес для переписки:

П.О. Буковский
Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН,
проспект Вернадского, д. 101, к. 1, г. Москва 119526, Россия
e-mail: bukovskiy.pavel@gmail.com

Address for correspondence:

P.O. Bukovskiy
Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS,
Pr. Vernadskogo, 101-1, Moscow 119526, Russia
e-mail: bukovskiy.pavel@gmail.com

Для цитирования:

П.О. Буковский, А.В. Морозов, В.В. Кулаков, А.К. Голубков,
Н.Б. Родионов, А.Н. Кириченко.
Триботехнические свойства углерод-углеродных фрикционных
композитов при высоких температурах.

Трение и износ.

2022. — Т. 43, № 5. — С. 491—501.

DOI: 10.32864/0202-4977-2022-43-5-491-501

For citation:

P.O. Bukovskiy, A.V. Morozov, V.V. Kulakov, A.K. Golubkov,
N.B. Rodionov, and A.N. Kirichenko.

[The Tribotechnical Properties of Carbon-Carbon Friction Composites
at High Temperatures].

Trenie i Iznos.

2022, vol. 43, no. 5, pp. 491—501 (in Russian).

DOI: 10.32864/0202-4977-2022-43-5-491-501

The Tribotechnical Properties of Carbon-Carbon Friction Composites at High Temperatures

P.O. Bukovskiy¹, A.V. Morozov¹, V.V. Kulakov², A.K. Golubkov², N.B. Rodionov³, and A.N. Kirichenko³

¹Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS,
Pr. Vernadskogo, 101-1, Moscow 119526, Russia

²PAO Aircraft Corporation “Rubin”,
kvartal Zapadnaya Promzona, shosse Entuziastov, d. 5, Balashikha 143912, Russia

³Private institution “ITER-Center”,
ulica Pushkovykh, d. 12, stroenie 104S, Troitsk 108840, Russia

Received 18.07.2022.

Revised 17.10.2022.

Accepted 18.10.2022.

Abstract

The paper presents the results of tribological tests of new carbon-carbon composites based on a pitch matrix and a material based on a pyrocarbon matrix, widely used by foreign companies, which were developed for aircraft multi-disc brakes. In the presented work, carbon composites differ in their internal structure, which is influenced by both the technology of carbon fiber production and the degree of its thermal treatment, as well as many other factors. The length of the fibers with which the composite matrix is reinforced also varies. Tribological properties were determined on the laboratory tribometer by the ring-ring contact scheme in the range of normal loads 0,5—1,1 MPa and sliding speeds of 1—4 m/s. The experimental study was carried out according to the method of a two-factor planned experiment. In order to eliminate the intense oxidation of the samples caused by their frictional heating, the tests were carried out in an inert gas environment. The friction film was studied by Raman spectroscopy using an excitation green laser with a wavelength of 532 nm. The tribological properties of the developed materials were determined, which demonstrate that the temperature on the friction surface has a significant influence on the friction coefficient and the wear rate of the material. In work it is found that on a friction surface the frictional film is formed, as a result of formation of the third body which in turn influences tribological properties of pair of a friction. Depending on the structure of the composite and the maximum temperature reached on its surface, the friction film can predominantly consist of both a matrix and carbon fiber.

Keywords: carbon composites, aircraft brakes, friction film.

DOI: 10.32864/0202-4977-2022-43-5-491-501

Адрес для переписки:

П.О. Буковский
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,
проспект Вернадского, д. 101, к. 1, г. Москва 119526, Россия
e-mail: bukovskiy.pavel@gmail.com

Address for correspondence:

P.O. Bukovskiy
Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS,
Pr. Vernadskogo, 101-1, Moscow 119526, Russia
e-mail: bukovskiy.pavel@gmail.com

Для цитирования:

П.О. Буковский, А.В. Морозов, В.В. Кулаков, А.К. Голубков,
Н.Б. Родионов, А.Н. Кириченко.
Триботехнические свойства углерод-углеродных фрикционных
композиций при высоких температурах.

Трение и износ.

2022. — Т. 43, № 5. — С. 491—501.

DOI: 10.32864/0202-4977-2022-43-5-491-501

For citation:

P.O. Bukovskiy, A.V. Morozov, V.V. Kulakov, A.K. Golubkov,
N.B. Rodionov, and A.N. Kirichenko.

[The Tribotechnical Properties of Carbon-Carbon Friction Composites
at High Temperatures].

Trenie i Iznos.

2022, vol. 43, no. 5, pp. 491—501 (in Russian).

DOI: 10.32864/0202-4977-2022-43-5-491-501

Список использованных источников

1. **Hutton T.J., Johnson D., and McEnaney B.** Effects of Fibre Orientation on the Tribology of a Model Carbon–Carbon Composite // *Wear*. — 2001 (249), 647—655
2. **Xiao P., Li Z., and Xiong X.** Microstructure and Tribological Properties of 3D Needle-Punched C/C–SiC Brake Composites // *Solid State Sci.* — 2010 (12), 617—623
3. **Zhang J.C., Luo R.Y., Xiang Q., and Yang C.** Compressive Fracture Behavior of 3D Needle-Punched Carbon/Carbon Composites // *Mater. Sci. Eng. A*. — 2011 (528), 5002
4. **Wu S., Liu Y., Ge Y., Ran L., Peng K., and Yi M.** Structural Transformation of Carbon/Carbon Composites for Aircraft Brake Pairs in the Braking Process // *Tribol Int.* — 2016 (102), 497—506
5. **Luo R., Huai X., Qu J., Ding H., and Xu S.** Effect of Heat Treatment on the Tribological Behavior of 2D Carbon/Carbon Composites // *Carbon*. — 2003 (41), no. 14, 2693—2701
6. **Yu S., Zhang F., Xiong X., Li Y., Tang N., Koizumi Y., and Chiba A.** Tribological Properties of Carbon/Carbon Composites with Various Pyrolytic Carbon Microstructures // *Wear*. — 2013. (304), 103—108
7. **Lei B., Yi M., He L., Xu H., Ran H., Ge Y., and Peng K.** Structural and Chemical Study of C/C Composites Before and After Braking Tests // *Wear*. — 2011 (272), 1—6
8. **Bokobza L., Bruneel J.-L., and Couzi M.** Raman Spectroscopy as a Tool for the Analysis of Carbon-Based Materials (Highly Oriented Pyrolytic Graphite, Multilayer Graphene and Multiwall Carbon Nanotubes) and of Some of their Elastomeric Composites // *Vib. Spectrosc.* — 2014 (74), 57—63
9. **Narita N., Kurosaki K., and Herai T.** Friction Mechanism of C/C Composites // *Proceedings of the International Symposium on Carbon*. Japan. — 1990, 386—389
10. **Chen J.D. and Ju C.P.** Low Energy Tribological Behavior of Carbon–Carbon Composites // *Carbon*. — 1995 (33), no. 1, 57—62
11. **Chen J.D. and Ju C.P.** Friction and Wear of PAN/pitch-, PAN/CVI- and Pitch/Resin/CVI- Based Carbon/Carbon Composites // *Wear*. — 1994 (174), nos. 1-2, 129—135
12. **Crocker P. and McEnaney B.** Oxidation and Fracture of a Woven 2D Carbon–Carbon Composite // *Carbon*. — 1991 (29), no. 7, 881—885
13. **Pogodin V.A., Astapov A.N., Eremkina M.S., Babaytsev A.V., and Rabinskiy L.N.** Investigation of the Low-Temperature Oxidation Effect on the Structure and Mechanical Properties of C/C Composite // *Nanoscience and Technology: An International Journal*. — 2021 (12), no. 3, 29—46
14. **Буковский П.О., Морозов А.В., Кириченко А.Н.** Влияние приработки на коэффициент трения углеродных композитных материалов авиационных тормозов // *Трение и износ*. — 2020 (41), № 4, 448—456
15. **Чичиназде А.В., Албагачиев А.Ю., Кожемякина В.Д., Коконин С.С., Суворов А.В., Кулаков В.В.** Оценка фрикционно-износных характеристик отечественных углеродных фрикционных композиционных материалов для нагруженных тормозов самолетов // *Трение и износ*. — 2009 (30), № 4, 359—371
16. **Zhang J., Luo R., Xiang Q., and Yang C.** Compressive Fracture Behavior of 3D Needle-Punched Carbon/Carbon Composites // *Materials Science and Engineering A*. — 2011 (528), no. 15, 5002—5006
17. **Deng H., Li K., Cui H., Li H., He Yi., Zheng J., and Song G.** Floating Catalyst Chemical Vapor Infiltration of Nanofilamentous Carbon Reinforced Carbon/Carbon Composites – Tribological Behavior and Wear Mechanism // *Tribology International*. — 2018 (121), 231—240

References

1. **Hutton T.J., Johnson D., and McEnaney B.** Effects of Fibre Orientation on the Tribology of a Model Carbon–Carbon Composite // *Wear*. — 2001 (249), 647—655
2. **Xiao P., Li Z., and Xiong X.** Microstructure and Tribological Properties of 3D Needle-Punched C/C–SiC Brake Composites // *Solid State Sci.* — 2010 (12), 617—623
3. **Zhang J.C., Luo R.Y., Xiang Q., and Yang C.** Compressive Fracture Behavior of 3D Needle-Punched Carbon/Carbon Composites // *Mater. Sci. Eng. A*. — 2011 (528), 5002
4. **Wu S., Liu Y., Ge Y., Ran L., Peng K., and Yi M.** Structural transformation of carbon/carbon composites for aircraft brake pairs in the braking process // *Tribol Int.* — 2016 (102), 497—506
5. **Luo R., Huai X., Qu J., Ding H., and Xu S.** Effect of Heat Treatment on the Tribological Behavior of 2D Carbon/Carbon Composites // *Carbon*. — 2003 (41), no. 14, 2693—2701
6. **Yu S., Zhang F., Xiong X., Li Y., Tang N., Koizumi Y., and Chiba A.** Tribological Properties of Carbon/Carbon Composites with Various Pyrolytic Carbon Microstructures // *Wear*. — 2013, (304), 103—108
7. **Lei B., Yi M., He L., Xu H., Ran H., Ge Y., and Peng K.** Structural and Chemical Study of C/C Composites Before and After Braking Tests // *Wear*. — 2011 (272), 1—6
8. **Bokobza L., Bruneel J.-L., and Couzi M.** Raman Spectroscopy as a Tool for the Analysis of Carbon-Based Materials (Highly Oriented Pyrolytic Graphite, Multilayer Graphene and Multiwall Carbon Nanotubes) and of Some of their Elastomeric Composites // *Vib. Spectrosc.* — 2014 (74), 57—63
9. **Narita N., Kurosaki K., and Herai T.** Friction Mechanism of C/C Composites // *Proceedings of the International Symposium on Carbon*. Japan. —

- 1990, 386—389
10. **Chen J.D. and Ju C.P.** Low Energy Tribological Behavior of Carbon–Carbon Composites // Carbon. — 1995 (33), no. 1, 57—62
 11. **Chen J.D. and Ju C.P.** Friction and Wear of PAN/pitch-, PAN/CVI- and Pitch/Resin/CVI- Based Carbon/Carbon Composites // Wear. — 1994 (174), nos. 1-2, 129—135
 12. **Crocker P. and McEnaney B.** Oxidation and Fracture of a Woven 2D Carbon-Carbon Composite // Carbon. — 1991 (29), no. 7, 881—885
 13. **Pogodin V.A., Astapov A.N., Eremkina M.S., Babaytsev A.V., and Rabinskiy L.N.** Investigation of the Low-Temperature Oxidation Effect on the Structure and Mechanical Properties of C/C Composite // Nanoscience and Technology: An International Journal. — 2021 (12), no. 3, 29—46
 14. **Bukovskiy P.O., Morozov A.V., and Kirichenko A.N.** Influence of Running-In on the Friction Coefficient of C/C Composite Materials for Aircraft Brakes // Journal of Friction and Wear. — 2020 (41), no. 4, 448—456
 15. **Chichinadze A.V., Albagachiev A.Y., Kozhemyakina V.D., Kokonin S.S., Suvorov A.V., and Kulakov V.V.** Assessment of Friction and Wear Characteristics of Domestic Friction Composite Materials in Loaded Aircraft Brakes // Journal of Friction and Wear. — 2009 (30), no. 4, 261—270
 16. **Zhang J., Luo R., Xiang Q., and Yang C.** Compressive Fracture Behavior of 3D Needle-Punched Carbon/Carbon Composites // Materials Science and Engineering A. — 2011 (528), no. 15, 5002—5006
 17. **Deng H., Li K., Cui H., Li H., He Yi., Zheng J., and Song G.** Floating Catalyst Chemical Vapor Infiltration of Nanofilamentous Carbon Reinforced Carbon/Carbon Composites – Tribological Behavior and Wear Mechanism // Tribology International. — 2018 (121), 231—240

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