

УДК 621.893:620.178.162.42

## Трибологические свойства углеродного тканевого композита при разной ориентации слоев ткани к направлению движения при трении

И.Г. Горячева<sup>1</sup>, А.Г. Шпенев<sup>1</sup>, П.О. Буковский<sup>1</sup>, О.О. Щербакова<sup>1</sup>, Т.И. Муравьева<sup>1</sup>, А.Ю. Кривошеев<sup>2</sup>, А.В. Каледин<sup>2</sup>, С.Л. Шикун<sup>3</sup>, В.Н. Курлов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН,  
пр. Вернадского, д. 101, к. 1., г. Москва 119526, Россия

<sup>2</sup>ООО «ГМК»,  
ул. Менделеева, д. 117, Ростовская обл., г. Таганрог 347913, Россия

<sup>3</sup>ИФТТ РАН им. Ю.А. Осипьяна,  
ул. Академика Осипьяна, 2, г. Черноголовка 142432, Россия

Поступила в редакцию 30.06.2023.

После доработки 11.12.2023.

Принята к публикации 12.12.2023.

Исследованы трибологические свойства углерод-углеродных антифрикционных композитных материалов, армированных углеродной тканью на основе полиакрилонитрильного и вискозного сырья. Трибоиспытания проводили по схеме кольцо—диск в паре с карбид-кремниевой керамикой в условиях сухого трения при различной ориентации слоев ткани композита относительно поверхности трения в диапазоне температур 80—100 °С. Получены зависимости коэффициента трения и скорости изнашивания от расположения ткани относительно поверхности трения, структуры композита и свойств его структурных составляющих при фиксированных нагрузке и скорости скольжения. С помощью методов сканирующей электронной микроскопии и оптической профилометрии проведён анализ поверхности композитов после трибологических испытаний. Выявлены механизмы трения и изнашивания композитов при разных конфигурациях контакта и различных свойствах материалов; определены характерные особенности фрикционного разрушения отдельных структурных элементов композита (волокон, пучков волокон, слоев армирующей ткани). Установлено, что образующаяся на поверхности трения плёнка продуктов износа оказывает определяющее влияние на трибологические характеристики исследованных материалов. Определены сочетания тканевой основы композита, её ориентации относительно поверхности трения и режима термообработки материала, обеспечивающие одновременно повышение износостойкости и снижение трения в условиях фрикционного взаимодействия в паре с керамическим контртелом.

**Ключевые слова:** углерод-углеродный тканевый композит, полиакрилонитрильное волокно, вискозное волокно, карбонизованное волокно, графитированное волокно, карбид-кремниевая керамика, коэффициент трения, износостойкость, структура поверхности трения, плёнка вторичных структур.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2023-44-6-493-503

**Адрес для переписки:**

А.Г. Шпенев  
Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН,  
пр. Вернадского, д. 101, к. 1., г. Москва 119526, Россия  
e-mail: kel-a-kris@list.ru

**Для цитирования:**

И.Г. Горячева, А.Г. Шпенев, П.О. Буковский, О.О. Щербакова,  
Т.И. Муравьева, А.Ю. Кривошеев, А.В. Каледин, С.Л. Шикун,  
В.Н. Курлов

Трибологические свойства углеродного тканевого композита при  
разной ориентации слоев ткани к направлению движения при трении.  
Трение и износ.

2023. — Т. 44, № 6. — С. 493—503.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2023-44-6-493-503

**Address for correspondence:**

A.G. Shpenev  
Institute for Problems in Mechanics RAS,  
Prospect Vernadskogo 101-1, Moscow, 119526, Russia  
e-mail: kel-a-kris@list.ru

**For citation:**

I.G. Goryacheva, A.G. Shpenev, P.O. Bukovskiy, O.O. Shcherbakova,  
T.I. Muravyeva, A.Yu. Krivosheev, A.V. Kaledin, S.L. Shikunov, and  
V.N. Kurlov

[Tribological Properties of a Carbon Fabric Composite with Different  
Orientations of Fabric Layers to the Movement Direction During Friction].  
*Trenie i Iznos*.

2023, vol. 44, no. 6, pp. 493—503 (in Russian).

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2023-44-6-493-503

# Tribological Properties of a Carbon Fabric Composite with Different Orientations of Fabric Layers to the Movement Direction During Friction

I.G. Goryacheva<sup>1</sup>, A.G. Shpenev<sup>1</sup>, P.O. Bukovskiy<sup>1</sup>, O.O. Shcherbakova<sup>1</sup>, T.I. Muravyeva<sup>1</sup>, A.Yu. Krivosheev<sup>2</sup>, A.V. Kaledin<sup>3</sup>, S.L. Shikunov<sup>3</sup>, and V.N. Kurlov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute for Problems in Mechanics RAS,  
Prospekt Vernadskogo 101-1, Moscow, 119526, Russia

<sup>2</sup>LLC “GMK”,  
Mendeleeva str. 117, Rostov Oblast, Taganrog 347913, Russia

<sup>3</sup>Institute of Solid State Physics RAS,  
Academician Osipyan str. 2, Chernogolovka 142432, Russia

Received 30.06.2023.

Revised 11.12.2023.

Accepted 12.12.2023.

## Abstract

The tribological properties of carbon-carbon antifriction composite materials reinforced with carbon fabric based on polyacrylonitrile and viscose raw materials have been studied. Tribological tests were carried out according to the ring-disc scheme paired with silicon carbide ceramics under dry friction conditions with different orientations of the composite fabric layers relative to the friction surface in the temperature range of 80-100 °C. Dependences of the friction coefficient and wear rate on the fabric orientation relative to friction surface, structure of composite and properties of its structural components were obtained at a fixed load and sliding speed. The surface of composites was analyzed after tribological tests using scanning electron microscopy and optical profilometry. The composites friction and wear mechanisms for different contact configurations and different material properties have been revealed. The characteristic features of composite individual structural (fibers, fiber bundles, layers of reinforcing fabric) frictional destruction have been determined. It has been established that wear products film formed on the friction surface has a decisive influence on the tribological characteristics of the studied materials. Combinations of the fabric base of the composite, its orientation relative to the friction surface and the heat treatment mode of the material were determined, which simultaneously provide increased wear resistance and reduced friction in tandem with a ceramic counterbody.

**Keywords:** C/C fabric composite, polyacrylonitrile fiber, viscose fiber, carbonized fiber, graphite fiber, silicon carbide ceramic, friction coefficient, wear resistance, friction surface structure, third body.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2023-44-6-493-503

---

### Адрес для переписки:

А.Г. Шпенев  
Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлунского РАН,  
пр. Вернадского, д. 101, к. 1., г. Москва 119526, Россия  
e-mail: kel-a-kris@list.ru

### Для цитирования:

И.Г. Горячева, А.Г. Шпенев, П.О. Буковский, О.О. Шчербакова,  
Т.И. Муравьева, А.Ю. Кривошеев, А.В. Каледин, С.Л. Шикунов,  
В.Н. Курлов

Трибологические свойства углеродного тканевого композита при  
разной ориентации слоев ткани к направлению движения при трении.  
Трение и износ.

2023. — Т. 44, № 6. — С. 493—503.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2023-44-6-493-503

---

### Address for correspondence:

A.G. Shpenev  
Institute for Problems in Mechanics RAS,  
Prospekt Vernadskogo 101-1, Moscow, 119526, Russia  
e-mail: kel-a-kris@list.ru

### For citation:

I.G. Goryacheva, A.G. Shpenev, P.O. Bukovskiy, O.O. Shcherbakova,  
T.I. Muravyeva, A.Yu. Krivosheev, A.V. Kaledin, S.L. Shikunov, and  
V.N. Kurlov

[Tribological Properties of a Carbon Fabric Composite with Different  
Orientations of Fabric Layers to the Movement Direction During Friction].  
*Trenie i Iznos*.

2023, vol. 44, no. 6, pp. 493—503 (in Russian).

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2023-44-6-493-503

## Список использованных источников

1. Хтет В.А., Шешин Е.П., Вэй З.Х. Основные свойства углеродных волокон на основе полиакрилонитрила (ПАН) // *Электроника и микроэлектроника СВЧ*. — 2019 (1), 265—267
2. Hu Z., Tong Y., Wang M., Xu J., and Yang C. Rapid and Low-Cost Carbon/Carbon Composites by Using Graphite Slurry Impregnated Prepregs // *Journal of the European Ceramic Society*. — 2023 (43), 4363—4373
3. Farfan-Cabrera L. I., Tapia-Gaspar M., and Pérez-González J. Tribology of Polymer Matrix Composites Within the Automotive Industry // *Encyclopedia of Materials: Composites*. — 2021 (1), 970—982
4. Sarower K., Chowdhury A.S., Sazzad H.A., Imtiaz A.C., and Faiz A. Review of the Developments in Composite Materials over the Last 15 Years // *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. — 2023
5. Karger-Kocsis J., Mahmood H., and Pegoretti A. All-Carbon Multi-Scale and Hierarchical Fibers and Related Structural Composites: A Review // *Composites Science and Technology*. — 2020 (186), 107932
6. Su H., Zhang C., and Sun S. Research on the Wear Model of Carbon/Carbon Composite Finger Seal // *Wear*. — 2021 (476), 203682
7. Мезрин А. М., Морозов А. В., Сачек Б. Я. [и др.] Трибологические характеристики эпоксидных углепластиков, модифицированных раствором теломеров тетрафторэтилена // *Трение и износ*. — 2013. (34), № 5, 483-489
8. Cheng H., Xue N.J., and Hou W.Q. The Application and Development of Carbon/Carbon Composites in Aircraft and High-Speed Train Braking Systems // *Carbon*. — 2020 (184), 30—33
9. Su F., Zhang Z., Wang K., Jiang W., and Liu W. Tribological and Mechanical Properties of the Composites Made of Carbon Fabrics Modified with Various Methods // *Composites: Part A*. — 2005 (36), no. 12, 1601—1607
10. Морозов А.В., Сачек Б.Я., Мезрин А.М. Оценка триботехнических свойств модифицированных эпоксидных углепластиков в проточной воде // *Вопросы материаловедения*. — 2012 (72), 58—65
11. Шикунов С.Л., Курлов В.Н. Получение композиционных материалов на основе карбида кремния силицированием углеродных матриц // *Журнал технической физики*. — 2017 (87), № 12, 1871—1878
12. Gomes J., Silva O., Silva C., Pardini L., and Silva R. The Effect of Sliding Speed and Temperature on the Tribological Behaviour of Carbon-Carbon Composites // *Wear*. — 2001 (249), nos. 3-4, 240—245
13. Shpenev A.G., Muravyeva T.I., Shkalei I.V., Kulakov V.V., and Golubkov A.K. The Study of the Surface Fracture During Wear of C/C Fiber

Composites by SPM and SEM // *Procedia Structural Integrity*. — 2020 (28), 1702—1708

14. Шпeneв А.Г., Муравьева Т.И., Шкалей И.В., Буковский П.О. Влияние поверхностной пленки (третьего тела) на процесс трения и изнашивания углеродных волокнистых композитов // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. — 2022, № 6, 90—95

## References

1. Htet V.A., Sheshin E.P., Vej Z.H. Osnovnye svojstva ugleirodnyh volokon na osnove poliakrilonitrila (PAN) // *Elektronika i mikroelektronika SVCH*. — 2019 (1), 265—267 (in Russian)
2. Hu Z., Tong Y., Wang M., Xu J., and Yang C. Rapid and Low-Cost Carbon/Carbon Composites by Using Graphite Slurry Impregnated Prepregs // *Journal of the European Ceramic Society*. — 2023 (43), 4363—4373
3. Farfan-Cabrera L. I., Tapia-Gaspar M., and Pérez-González J. Tribology of Polymer Matrix Composites Within the Automotive Industry // *Encyclopedia of Materials: Composites*. — 2021 (1), 970—982
4. Sarower K., Chowdhury A.S., Sazzad H.A., Imtiaz A.C., and Faiz A. Review of the Developments in Composite Materials over the Last 15 Years // *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. — 2023
5. Karger-Kocsis J., Mahmood H., and Pegoretti A. All-Carbon Multi-Scale and Hierarchical Fibers and Related Structural Composites: A Review // *Composites Science and Technology*. — 2020 (186), 107932
6. Su H., Zhang C., and Sun S. Research on the Wear Model of Carbon/Carbon Composite Finger Seal // *Wear*. — 2021 (476), 203682
7. Mezrin A.M., Morozov A.V., Sachek B.Y., and Goryacheva I.G. Tribological Characteristics of Epoxy Carbon-Fiber-Reinforced Plastics Modified by Solution of Polytetrafluorethylene Telomers // *J. Frict. Wear*. — 2013 (34), 368—373
8. Cheng H., Xue N.J., and Hou W.Q. The Application and Development of Carbon/Carbon Composites in Aircraft and High-Speed Train Braking Systems // *Carbon*. — 2020 (184), 30—33
9. Su F., Zhang Z., Wang K., Jiang W., and Liu W. Tribological and Mechanical Properties of the Composites Made of Carbon Fabrics Modified with Various Methods // *Composites: Part A*. — 2005 (36), no. 12, 1601—1607
10. Morozov A.V., Sachek B.Y.A., Mezrin A.M. Ocenka tribotekhnicheskikh svojstv modificirovannyh epoksidnyh ugleplastikov v protochnoj vode // *Voprosy materialovedeniya*. — 2012 (72), 58—65 (in Russian)
11. Shikunov S.L. and Kurlov V.N. SiC-Based Composite Materials Obtained by Siliconizing Carbon Matrices // *Tech. Phys*. — 2017 (62), 1869—1876
12. Gomes J., Silva O., Silva C., Pardini L., and

- Silva R.** The Effect of Sliding Speed and Temperature on the Tribological Behaviour of Carbon–Carbon Composites // *Wear*. — 2001 (**249**), nos. 3-4, 240—245
13. **Shpenev A.G., Muravyeva T.I., Shkalei I.V., Kulakov V.V., and Golubkov A.K.** The Study of the Surface Fracture During Wear of C/C Fiber Composites by SPM and SEM // *Procedia Structural Integrity*. — 2020 (**28**), 1702—1708
14. **Shpenev A.G., Muravyeva T.I., Shkalei I.V., and Bukovskiy P.O.** Influence of the Surface Film (Third Body) on the Friction and Wear Process of Carbon-Fiber Composites // *Journal of Surface Investigation*. — 2022 (**16**), no. 3, 397—401

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)