

УДК 620.186.4

## Модификация триботехнических свойств углеродных композитов методом лазерной обработки поверхности

А.Г. Шпенев<sup>1</sup>, П.О. Буковский<sup>1</sup>, О.О. Щербакова<sup>1</sup>, Т.И. Муравьева<sup>1</sup>, В.Н. Андросенко<sup>1</sup>, М.А. Котов<sup>1</sup>, Н.Г. Соловьев<sup>1</sup>, М.Ю. Якимов<sup>1</sup>, А.Ю. Кривошеев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>Общество с ограниченной ответственностью «ГАЗ МЕТАЛЛОКОМПЛЕКТ», ул. Менделеева, д.117, г. Таганрог 347913, Россия

Поступила в редакцию 03.10.2023.

После доработки 08.02.2024.

Принята к публикации 15.02.2024.

Исследована структура и триботехнические характеристики композитного материала на основе углеродной ПАН ткани и матрицы, полученной методом осаждения из газовой фазы. Один из образцов исследуемого материала был подвергнут обработке лазерным излучением, с локальным лазерным разогревом поверхностного слоя до 2800—3000 °С. Другой образец композита был термически обработан при температуре  $T > 2000$  °С. Были проведены триботехнические испытания и получены значения коэффициентов трения и изнашивания в паре со стальным и керамическим контртелами. С целью определения особенностей механизмов трения и изнашивания модифицированных материалов, поверхность композитов после трения была исследована методом сканирующей электронной микроскопии с рентгеноспектральным анализом. Установлено, что лазерная обработка значительно улучшает антифрикционные свойства углеродного композита в паре со стальным контртелом (уменьшение коэффициента трения в два раза, уменьшение износа в три раза). Выявлено, что такая обработка значительно меняет характер плёнки вторичных структур (ВС), формирующейся на поверхности трения композитов в паре со сталью. В составе плёнки не обнаруживаются элементы материала контртела, что свидетельствует о его минимальном износе в процессе трения. Сама плёнка ВС становится толще и плотнее, полностью покрывая поверхность композита. Это позволяет ей в большей степени проявлять твёрдосмазочные и противоизносные свойства, улучшая триботехнические характеристики композита.

**Ключевые слова:** углерод-углеродный тканевый композит, лазерная термообработка, коэффициент трения, износостойкость, трибология композитов, структура композитов, сканирующая электронная микроскопия.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-1-49-58

**Адрес для переписки:**

А.Г. Шпенев  
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: kel-a-kris@list.ru

**Address for correspondence:**

A.G. Shpenev  
Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy  
of Sciences,  
prospect Vernadskogo, 101, building 1, Moscow 119526, Russia  
e-mail: kel-a-kris@list.ru

**Для цитирования:**

А.Г. Шпенев, П.О. Буковский, О.О. Щербакова, Т.И. Муравьева,  
В.Н. Андросенко, М.А. Котов, Н.Г. Соловьев, М.Ю. Якимов,  
А.Ю. Кривошеев.

Модификация триботехнических свойств углеродных композитов  
методом лазерной обработки поверхности.

Трение и износ.  
2024. – Т. 45, № 1. – С. 49–58.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-1-49-58

**For citation:**

A.G. Shpenev, P.O. Bukovskiy, O.O. Shcherbakova, T.I. Muravyeva,  
V.N. Androsenko, M.A. Kotov, N.G. Solovyev, M.Yu. Yakimov, and  
A.Yu. Krivosheev.

[Modification of Tribotechnical Properties of Carbon Composites by  
Laser Surface Treatment Method].

*Trenie i Iznos.*  
2024, vol. 45, no. 1, pp. 49–58 (in Russian).

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-1-49-58

# Modification of Tribotechnical Properties of Carbon Composites by Laser Surface Treatment Method

A.G. Shpenev<sup>1</sup>, P.O. Bukovskiy<sup>1</sup>, O.O. Shcherbakova<sup>1</sup>, T.I. Muravyeva<sup>1</sup>, V.N. Androsenko<sup>1</sup>, M.A. Kotov<sup>1</sup>, N.G. Solovyev<sup>1</sup>, M.Yu. Yakimov<sup>1</sup>, and A.Yu. Krivosheev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, prospect Vernadskogo, 101, building 1, Moscow 119526, Russia

<sup>2</sup>LLC “GMK”, Mendeleeva street, 117, Taganrog 347913, Russia

Received 03.10.2023.

Revised 08.02.2024.

Accepted 15.02.2024.

## Abstract

The study of structure and tribotechnical characteristics of composite material based on carbon PAN fabric and matrix obtained by vapor deposition method has been carried out. One of the samples of the investigated material was subjected to laser treatment, with local laser heating of the surface layer to 2800–3000 °C. The other composite sample was heat treated at a temperature  $T > 2000$  °C. Tribotechnical tests were carried out and values of friction and wear coefficients were obtained in the pair with steel and ceramic counterbodies. In order to determine the peculiarities of friction and wear mechanisms of modified materials, the surface of composites after friction was investigated by scanning electron microscopy with X-ray spectral analysis. It was found that laser treatment significantly improves antifriction properties of carbon composite in pair with steel counterbody (friction coefficient reduction by two times, wear reduction by three times). It is revealed that such treatment significantly changes the nature of the film of secondary structures (SS) formed on the friction surface of composites paired with steel. In the composition of the film elements of the counterbody material are not found, which indicates its minimal wear in the process of friction. The BC film itself becomes thicker and denser, completely covering the composite surface. This allows it to a greater extent to show solid-lubricating and anti-wear properties, improving tribotechnical characteristics of the composite.

**Keywords:** carbon-carbon fabric composite, laser heat treatment, friction coefficient, wear resistance, composite tribology, composite structure, scanning electron microscopy.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-1-49-58

---

### Адрес для переписки:

А.Г. Шпенев  
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: kel-a-kris@list.ru

### Для цитирования:

А.Г. Шпенев, П.О. Буковский, О.О. Щербакова, Т.И. Муравьева,  
В.Н. Андросенко, М.А. Котов, Н.Г. Соловьев, М.Ю. Якимов,  
А.Ю. Кривошеев.

Модификация триботехнических свойств углеродных композитов  
методом лазерной обработки поверхности.

Трение и износ.  
2024. – Т. 45, № 1. – С. 49–58.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-1-49-58

---

### Address for correspondence:

A.G. Shpenev  
Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy  
of Sciences,  
prospect Vernadskogo, 101, building 1, Moscow 119526, Russia  
e-mail: kel-a-kris@list.ru

### For citation:

A.G. Shpenev, P.O. Bukovskiy, O.O. Shcherbakova, T.I. Muravyeva,  
V.N. Androsenko, M.A. Kotov, N.G. Solovyev, M.Yu. Yakimov, and  
A.Yu. Krivosheev.

[Modification of Tribotechnical Properties of Carbon Composites by  
Laser Surface Treatment Method].

*Trenie i Iznos*.  
2024, vol. 45, no. 1, pp. 49–58 (in Russian).

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-1-49-58

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **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. — Elsevier. — 2023
2. **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
3. **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 // Tribology International. — 2016 (102), 497—506
4. **Hao M., Luo R., Hou Z., Yang W., Xiang Q., and Yang C.** Effect of Fiber-Types on the Braking Performances of Carbon/Carbon Composites // Wear. — 2014 (319), nos. 1-2, 145—149
5. **Lu F., Lu L., Liu J., Pang X., and Song C.** Tribological Properties and Wear Mechanism of C/C Composite Applied in Finger Seal // Machines. — 2023 (11), no. 2, 176
6. **Su H., Zhang C., and Sun S.** Research on the Wear Model of Carbon/Carbon Composite Finger Seal // Wear. — 2021 (476), 203682
7. **Темис Ю.М., Селиванов А.В.** Перспективные уплотнения для газотурбинных двигателей // Авиационные двигатели. — 2021 (11), № 2, 43—60
8. **Буковский П.О., Морозов А.В., Кулаков В.В., Голубков А.К., Родионов Н.Б., Кириченко А.Н.** Триботехнические свойства углерод-углеродных фрикционных композитов при высоких температурах // Трение и износ. — 2022 (43), № 5, 491—501
9. **Григорьянц А.Г., Сафонов А.Н.** Основы лазерного термоупрочнения сплавов. — М.: Высш. шк. — 1988
10. **Al-Sulaiman F. and Yilbas B.** Laser Treatment of a Carbon/Carbon Reinforced Composite // Lasers in Engineering. — 2005 (15), 119—127
11. **Volkovich Y.M., Sakars A.V., and Volinsky A.A.** Application of the Standart Porosimetry Method for Nanomaterials // Int. nanotechnology. — 2005 (2), no. 3, 292—302
12. **Андросенко В.Н., Якимов М.Ю.** Параметры лазерной поверхностной термообработки углерод-углеродного композиционного материала // Механика и моделирование материалов и технологий. Сборник трудов Секции Международной молодежной научной конференции «XLVII Гагаринские чтения» 20–23 апреля 2021. — Москва: ИПМех РАН. — 2021, 11—14
13. **Шпенев А.Г.** Влияние термоупругой неустойчивости на износ композитных тормозных дисков // Трение и износ. — 2021 (42), № 1, 52—62
14. **Щербаква О.О., Буковский П.О., Муравьева Т.И., Шпенев А.Г., Кривошеев А.Ю., Каледин А.В., Шикунев С.Л., Курлов В.Н.** Исследование влияния материала контртела на

трибологические характеристики углеродных композитов на основе тканевых препрегов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 2024, Принято в печать

## References

1. **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. — Elsevier. — 2023
2. **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
3. **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 // Tribology International. — 2016 (102), 497—506
4. **Hao M., Luo R., Hou Z., Yang W., Xiang Q., and Yang C.** Effect of Fiber-Types on the Braking Performances of Carbon/Carbon Composites // Wear. — 2014 (319), nos. 1-2, 145—149
5. **Lu F., Lu L., Liu J., Pang X., and Song C.** Tribological Properties and Wear Mechanism of C/C Composite Applied in Finger Seal // Machines. — 2023 (11), no. 2, 176
6. **Su H., Zhang C., and Sun S.** Research on the Wear Model of Carbon/Carbon Composite Finger Seal // Wear. — 2021 (476), 203682
7. **Temis Yu.M., Selivanov A.V.** Perspektivnye uplotneniya dlya gazoturbinnih dvigatelej // Aviacionnye dvigateli. — 2021 (11), № 2, 43—60 (in Russian)
8. **Bukovskiy, P.O., Morozov, A.V., Kulakov, V.V., Golubkov A.K., Rodionov N.B., Kirichenko A.N.** High-Temperature Tribotechnical Properties of Carbon–Carbon Friction Composites // J. Frict. Wear. — 2022 (43), 322—329
9. **Grigoryanc A.G., Safonov A.N.** Osnovy lazernogo termouprochneniya splavov. — M.: Vyssh. shk. — 1988 (in Russian)
10. **Al-Sulaiman F. and Yilbas B.** Laser Treatment of a Carbon/Carbon Reinforced Composite // Lasers in Engineering. — 2005 (15), 119—127
11. **Volkovich Y.M., Sakars A.V., and Volinsky A.A.** Application of the Standart Porosimetry Method for Nanomaterials // Int. nanotechnology. — 2005 (2), no. 3, 292—302
12. **Androsenko V.N., Yakimov M.Yu.** Parametry lazernoj poverhnostnoj termoobrabotki uglerod-uglerodnogo kompozicionnogo materiala // Mekanika i modelirovanie materialov i tekhnologij. Sbornik trudov Sekcii Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchnoj konferencii «XLVII Gagarinskije chteniya» 20-23 aprelya 2021. — Moskva: IPMekh RAN. — 2021, 11—14 (in Russian)
13. **Shpenev A.G.** The Influence of the Thermoelastic

- Instability on the Wear of Composite Brake Discs // J. Frict. Wear. — 2021 (42), 30—37
14. **Shcherbakova O.O., Bukovskij P.O., Murav'eva T.I., Shpenev A.G., Krivosheev A.Yu., Kaledin A.V., Shikunov S.L., Kurlov V.N.** Study

of influence a counterbody material on the tribological characteristics of c/c composites based on fabric prepregs // Journal of Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. — 2024, accepted for publication.

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@mpri.org.by](mailto:FWJ@mpri.org.by)