

УДК 620.178.16

Теоретико-экспериментальное исследование контактно-усталостного разрушения углерод-углеродных композитов

П.О. Буковский, И.Г. Горячева

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук,
просп. Вернадского, д. 101, к. 1, г. Москва 119526, Россия

Поступила в редакцию 12.05.2021.

После доработки 23.10.2021.

Принята к публикации 25.10.2021.

Проведены трибологические испытания углерод-углеродных композитных материалов (УУКМ) на циклическое нагружение по схеме контакта «стальной шарик — диск композита» с вариацией контактных нагрузок P в интервале 50—100 Н при постоянной скорости скольжения $V = 1$ м/с и температуре окружающей среды $T = 23^\circ\text{C}$. Рассмотрены три вида углеродных композитов (два на основе графитированных углеродных волокон отличающиеся между собой длиной 40 и 5 мм соответственно и один на основе карбонизированных углеродных волокон длиной 40 мм). Изучение глубины усталостного разрушения поверхностных слоев композитов проводилось бесконтактным способом при помощи оптического профилометра SensoFar S Neox с использованием 20-ти кратного объектива в конфокальном режиме сбора измерений. Выполнено моделирование на макроуровне процесса циклического нагружения композита и накопления в нем усталостных повреждений, на основании которого рассчитаны количество циклов до разрушения и глубина зарождения усталостной трещины. Проведенные сравнения теоретических и экспериментальных результатов для всех исследуемых материалов позволили сделать выводы о влиянии характера нагружения и внутренней структуры рассмотренных материалов на разрушение их поверхностных слоев по усталостному механизму в условиях фрикционного взаимодействия, а также определить параметры функции накопления поврежденности на макроуровне. Определение показателя степени в критерии накопления усталостных повреждений откроет возможность прогнозирования начала разрушения рассматриваемых композитных материалов в условиях фрикционных испытаний при циклическом характере взаимодействия для произвольных нагрузок, приложенных к индентору.

Ключевые слова: углеродный композит, углеродные волокна, усталостное разрушение, функция поврежденности.

DOI: 10.32864/0202-4977-2021-42-5-539-551

Адрес для переписки:

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

Для цитирования:

П.О. Буковский, И.Г. Горячева.
Теоретико-экспериментальное исследование контактно-усталостного разрушения углерод-углеродных композитов.
Трение и износ.
2021. — Т. 42, № 5. — С. 539—551.
DOI: 10.32864/0202-4977-2021-42-5-539-551

Address for correspondence:

P.O. Bukovskiy
Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics,
of the Russian Academy of Sciences
Vernadsky Avenue, 101-1, Moscow 119526, Russia
e-mail: bukovskiy.pavel@gmail.com

For citation:

P.O. Bukovskiy and I.G. Goryacheva.
[Theoretical and Experimental Study of Carbon-Carbon Composites
Contact Fatigue Failure].
Trenie i Iznos.
2021, vol. 42, no. 5, pp. 539—551 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2021-42-5-539-551

Theoretical and Experimental Study of Carbon-Carbon Composites Contact Fatigue Failure

P.O. Bukovskiy and I.G. Goryacheva

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences,
Vernadsky Avenue, 101-1, Moscow 119526, Russia

Received 12.05.2021.

Revised 23.10.2021.

Accepted 25.10.2021.

Abstract

Tribological tests of carbon-carbon composites (C/C composites) were carried out for cyclic loading using the “steel ball — carbon disc” contact scheme with variation of contact loads P in the range 50—100 N at a constant sliding velocity $V = 1$ m/s and ambient temperature $T = 23^\circ\text{C}$. Three types of carbon composites (two are reinforced by graphitized carbon fibers of different lengths 40 mm and 5 mm, respectively and one is reinforced by carbonized carbon fibers with lengths of 40 mm) were considered. The depth of fatigue fracture of the surface layers of composites was studied by a non-contact method using an optical profilometer SensoFar S Neox with a 20x objective in the confocal mode of measurement collection. Modeling of cyclic loading and the fatigue damage accumulation process within the composites under considerations at macrolevel was carried out, and the depths of fatigue crack initiation were calculated under loading/velocity conditions using in the test. Comparison of the theoretical and experimental results made it possible to analyze the influence of the loading conditions and the composite structure on the destruction of the composite subsurface layer by fatigue mechanism in friction interaction, and also to determine the parameters of the damage accumulation function at macrolevel. Determination of the degree index in the fatigue damage accumulation criterion opens the possibility to predict the beginning of failure of the considered composite material under friction tests with cyclic character of interaction for production loads applied to the indentor.

Keywords: carbon composite, carbon fiber, fatigue damage, damage function.

DOI: 10.32864/0202-4977-2021-42-5-539-551

Адрес для переписки:

П.О. Буковский
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского
Российской академии наук,
просп. 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,
of the Russian Academy of Sciences
Vernadsky Avenue, 101-1, Moscow 119526, Russia
e-mail: bukovskiy.pavel@gmail.com

Для цитирования:

П.О. Буковский, И.Г. Горячева.
Теоретико-экспериментальное исследование контактно-
усталостного разрушения углерод-углеродных композитов.
Трение и износ.
2021. — Т. 42, № 5. — С. 539—551.
DOI: 10.32864/0202-4977-2021-42-5-539-551

For citation:

P.O. Bukovskiy and I.G. Goryacheva.
[Theoretical and Experimental Study of Carbon-Carbon Composites
Contact Fatigue Failure].
Trenie i Iznos.
2021, vol. 42, no. 5, pp. 539—551 (in Russian).
DOI: 10.32864/0202-4977-2021-42-5-539-551

Список использованных источников

1. Гуняев Г.М., Гофин М.Я. Углерод-углеродные композиционные материалы // Авиационные материалы и технологии. — 2013, 62—90
 2. Крамаренко Е.И., Кулаков В.В., Кенигфест А.М., Лисовский С.А., Мозалев В.В. Авиационные тормоза с углеродными фрикционными дисками // Трение и износ. — 2006 (27), № 3, 290—298
 3. Wu S., Yi M., Ge Y., Ran L., and Peng K. Effect of Carbon Fiber Reinforcement on the Tribological Performance and behavior of Aircraft Carbon Brake Discs // Carbon. — 2017 (117), 279—292
 4. Krenkel W. and Georges T.J. Ceramic Matrix Composites for Friction Applications // Ceramic Matrix Composites. — 2014, 647—671
 5. Tsai S.W. Strength Characteristics of Composite Materials. — NASA, CR-224. — 1965
 6. Grimmer C.S. and Dharan C.K.H. High-Cycle Fatigue of Hybrid Carbon Nanotube/Glass Fiber/Polymer Composites // Journal of Material Science. — 2008 (43), 4487—4492
 7. Паймушин В.Н., Холмогоров С.А., Каюмов Р.А. Экспериментальные исследования механизмов формирования остаточных деформаций волокнистых композитов слоистой структуры при циклическом нагружении // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. — 2017 (159), 473—492
 8. Zhao S., Hilmas G.E., and Dharani L.R. Numerical Simulation of Wear in a C/C Composite Multi-disk Clutch // Carbon. — 2009 (49), 2219—2225
 9. Чичинадзе 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
 10. Чичинадзе А.В., Кожемякина В.Д., Суворов А.В. Методика расчета температурного поля в модельных кольцевых образцах при двухстороннем трении на новой универсальной машине трения ИМ-58-т2 применительно к многодисковым тормозам самолетов // Трение и износ. — 2010 (31), № 1, 38—47
 11. Wu S., Liu Y., Ge Y., Ran L., Peng K., and Yi M. Surface Structures of PAN-Based Carbon Fibers and Their Influences on the Interface Formation and Mechanical Properties of Carbon-Carbon Composites // Composites: Part A. — 2016 (90), 480—488
 12. Фудзии Т., Дзако М. Механика разрушения композиционных материалов. Пер. с японск. — М.: Мир. — 1982
 13. Усейнов А.С., Кравчук К.С., Кенигфест А.М. Механические свойства углеродных композиционных материалов // Наноиндустрия. — 2011, № 6, 24—26
 14. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. — М.: Мир. — 1989
 15. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. — М.: Наука. — 2001
- ## References
1. Gunyaev G.M., Gofin M.Ya. Uglerod-uglerodnye kompozicionnye materialy // Aviacionnye materialy i tekhnologii. — 2013, 62—90 (in Russian)
 2. Kramarenko E.I., Kulakov V.V., Kenigfest A.M., Lisovskij S.A., Mozalev V.V. Aviacionnye tormoza s uglerodnymi frikcionnymi diskami // Trenie i iznos. — 2006 (27), № 3, 290—298 (in Russian)
 3. Wu S., Yi M., Ge Y., Ran L., and Peng K. Effect of Carbon Fiber Reinforcement on the Tribological Performance and behavior of Aircraft Carbon Brake Discs // Carbon. — 2017 (117), 279—292
 4. Krenkel W. and Georges T.J. Ceramic Matrix Composites for Friction Applications // Ceramic Matrix Composites. — 2014, 647—671
 5. Tsai S.W. Strength Characteristics of Composite Materials. — NASA, CR-224. — 1965
 6. Grimmer C.S. and Dharan C.K.H. High-Cycle Fatigue of Hybrid Carbon Nanotube/Glass Fiber/Polymer Composites // Journal of Material Science. — 2008 (43), 4487—4492
 7. Pajmushin V.N., Holmogorov S.A., Kayumov R.A. Eksperimental'nye issledovaniya mehanizmov formirovaniya ostatochnyh deformacij voloknistyh kompozitov sloistoj struktury pri ciklicheskom nagruzhenii // Uchen. zap. Kazan. un-ta. Ser. Fiz.-matem. nauki. — 2017 (159), 473—492 (in Russian)
 8. Zhao S., Hilmas G.E., and Dharani L.R. Numerical Simulation of Wear in a C/C Composite Multi-disk Clutch // Carbon. — 2009 (49), 2219—2225
 9. 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
 10. Chichinadze A.V., Kozhemyakina V.D., Suvorov A.V. Method of Temperature-Field Calculation in Model Ring Specimens During Bilateral Friction in Multidisk Aircraft Brakes with the IM-58-T2 New Multipurpose Friction Machine // Journal of Friction and Wear. — 2010 (31), no. 1, 23—32
 11. Wu S., Liu Y., Ge Y., Ran L., Peng K., and Yi M. Surface Structures of PAN-Based Carbon Fibers and Their Influences on the Interface Formation and Mechanical Properties of Carbon-Carbon Composites // Composites: Part A. — 2016 (90), 480—488
 12. Fujii T., Zako M. Mekhanika razrusheniya kompozicionnyh materialov. Per. s yaponsk. — Moscow: Mir. — 1982 (in Russian)
 13. Useinov A.S., Kravchuk K.S., Kenigfest A.M. Mekhanicheskie svojstva uglerodnyh kompozicionnyh materialov // Nanoindustriya. — 2011, № 6,

- 24—26 (in Russian)
14. **Johnson K.** Contact Mechanics. — Cambridge University Press. — 1985
15. **Goryacheva I.G.** Mekhanika frikcionnogo vzaimodejstviya. — Moscow: Nauka. — 2001 (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