

<http://doi.org/10.32864/polymmattech-2020-6-1-46-53>

УДК 678.743.41

## ВЛИЯНИЕ КОМБИНИРОВАННЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА СВОЙСТВА ФТОРОПЛАСТОВЫХ КОМПОЗИТОВ

А. П. ВАСИЛЬЕВ<sup>1+</sup>, Т. С. СТРУЧКОВА<sup>1</sup>, А. А. ОХЛОПКОВА<sup>1</sup>, С. Р. САВВИНОВА<sup>1</sup>, А. Г. АЛЕКСЕЕВ<sup>1</sup>,  
П. Н. ГРАКОВИЧ<sup>2</sup>, С. А. СЛЕПЦОВА<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова, ул. Белинского, 58, 677000, г. Якутск, Россия

<sup>2</sup>Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси, ул. Кирова, 32а, 246050, Гомель, Беларусь

*В данной работе приведены результаты исследования влияния комбинированных наполнителей, содержащих углеродные волокна, механоактивированный вермикулит и ультрадисперсный политетрафторэтилен (УПТФЭ) на прочностные свойства, триботехнические характеристики, структурные особенности композиционных материалов на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ).*

*Показано, что введение комбинированных наполнителей углеродное волокно + вермикулит приводит к увеличению твердости и снижению интенсивности изнашивания полимерных композитов до 730–970 раз по сравнению с исходной полимерной матрицей из ПТФЭ. Дополнительное введение УПТФЭ позволяет снизить коэффициент трения композитов по сравнению с материалами, содержащими бинарный наполнитель.*

*Методами электронной микроскопии и ИК спектроскопии исследованы поверхности трения полимерных композитов. Выявлено, что в результате фрикционного контакта на поверхности трения полимерных композитов, содержащих комбинированный наполнитель, между отдельными волокнами формируются вторичные структуры, которые не характерны для композитов, содержащих только углеродные волокна. Вероятно, образование износостойких вторичных структур в процессе трения и обуславливает увеличение износостойкости композитов.*

**Ключевые слова:** политетрафторэтилен, углеродное волокно, вермикулит, полимерный композиционный материал, износостойкость, коэффициент трения, вторичные структуры.

## STUDY OF TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF PTFE FILLED WITH COMBINED FILLERS

A. P. VASILEV<sup>1+</sup>, T. S. STRUCHKOVA<sup>1</sup>, A. A. OKHLOPKOVA<sup>1</sup>, S. R. SAVVINOVA<sup>1</sup>, A. G. ALEKSEEV<sup>1</sup>,  
P. N. GRAKOVICH<sup>2</sup>, S. A. SLEPTSOVA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>North-Eastern Federal University, Belinsky St., 58, 677000, Yakutsk, Russia

<sup>2</sup>V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus, 32a, Kirov St., 246050, Gomel, Belarus

*The tribological properties of polytetrafluoroethylene (PTFE) and PTFE composites with combined fillers containing carbon fibers, mechanically activated vermiculite, and ultrafine polytetrafluoroethylene (UPTFE), was studied.*

*The combined fillers additions found to increase hardness and wear resistance in all composites studied. The introduction of combined fillers carbon fiber + vermiculite leads to a decrease in the wear rate of PTFE composites up to 730–970 times in comparison with the initial polymer matrix. The UPTFE addition in composites allows one to reduce the coefficient of friction of composites in comparison with materials containing the binary filler.*

*Scanning electron microscopy (SEM) and IR spectroscopy was utilized to examine the worn surfaces of polymer composites. Wear testing and SEM analysis showed that on the worn surface of PTFE composites*

<sup>+</sup> Автор, с которым следует вести переписку. E-mail: gtvar@mail.ru

with combined fillers, secondary structures are formed between the individual fibers, which are not typical for composites containing only carbon fibers. The results indicated that formation of wear-resistant secondary structures during wear testing causes an increase in the wear resistance of composites.

**Keywords:** polytetrafluoroethylene, carbon fiber, vermiculite, polymer composite material, wear resistance, coefficient of friction, secondary structures.

Поступила в редакцию 20.11.2019

© А. П. Васильев, Т. С. Стручкова, А. А. Охлопкова, С. Р. Саввинова, А. Г. Алексеев, П. Н. Гракович, С. А. Слепцова, 2020

Для приобретения полного текста статьи, обращайтесь в [редакцию журнала](#)  
Full text of articles can be purchased from the editorial office

Адрес редакции: ул. Кирова, 32а, 246050, г. Гомель, Беларусь  
Телефон/факс: +375 (232) 34 06 36 / 34 17 11

Address: Kirov St., 32a, 246050, Gomel, Belarus  
Phone: +375 (232) 34 06 36. Fax: +375 (232) 34 17 11

E-mail: [polmattex@gmail.com](mailto:polmattex@gmail.com)  
Web: <http://mpri.org.by/izdaniya/pmt/>

#### Образец цитирования:

Васильев А. П., Стручкова Т. С., Охлопкова А. А., Саввинова С. Р., Алексеев А. Г., Гракович П. Н., Слепцова С. А. Влияние комбинированных наполнителей на свойства фторопластовых композитов // Полимерные материалы и технологии. 2020. Т. 6, № 1. С. 46–53. <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2020-6-1-46-53>

#### Citation sample:

Vasil'ev A. P., Struchkova T. S., Okhlopko A. A., Savvinova S. R., Alekseev A. G., Gra-kovich P. N., Sleptsova S. A. Vliyanie kombinirovannykh napolniteley na svoystva ftoroplastovykh kompozitov [Study of tribological properties of ptfe filled with combined fillers]. *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer Materials and Technologies], 2020, vol. 6, no. 1, pp. 46–53. <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2020-6-1-46-53>

#### Литература

1. Luo W., Liu Q., Li Y., Zhou S., Zou H., Liang M. Enhanced mechanical and tribological properties in polyphenylene sulfide/polytetrafluoroethylene composites reinforced by short carbon fiber // *Composites. Part B: Engineering*, 2016, vol. 91, pp. 579–588. doi: 10.1016/j.compositesb.2016.01.036
2. Sharma S., Bijwe J., Panier S. Exploration of potential of Zylon and Aramid fibers to enhance the abrasive wear performance of polymers // *Wear*, 2019, vol. 422, pp. 180–190. doi: 10.1016/j.wear.2019.01.068
3. Люкшин Б. А., Шилько С. В., Панин С. В., Машков Ю. К., Корниенко Л. А., Люкшин П. А., Плещачевский Ю. М., Кропотин О. В., Бочкарева С. А., Матолыгина М. Ю., Черноус Д. А., Гришаева Н. Ю., Реутов Ю. А. Дисперсно-наполненные полимерные композиты технического и медицинского назначения / отв. ред. А. В. Герасимов. Новосибирск: СО РАН, 2017. 311 с.
4. Blanchet T. A., Kennedy F. E. Sliding wear mechanism of polytetrafluoroethylene (PTFE) and PTFE composites // *Wear*, 1992, vol. 153, no. 1, pp. 229–243. doi: 10.1016/0043-1648(92)90271-9
5. Zhang L., Zhang G., Chang L., Wetzel B., Jim B., Wang Q. Distinct tribological mechanisms of silica nanoparticles in epoxy composites reinforced with carbon nanotubes, carbon fibers and glass fibers // *Tribology International*, 2016, vol. 104, pp. 225–236. doi: 10.1016/j.triboint.2016.09.001
6. Гракович П. Н., Шелестова В. А., Иванов Л. Ф., Целуев М. Ю., Жандаров С. Ф. Исследование структуры и свойств граничных слоев в композиционных материалах на основе ПТФЭ // *Полимерные материалы и технологии*, 2017, Т. 3, № 3. С. 14–26. <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2017-3-3-14-26>
7. Охлопкова А. А., Васильев А. П., Стручкова Т. С., Алексеев А. Г., Гракович П. Н. Влияние углеродных волокон и дисульфида вольфрама на свойства и структуру политефторэтилена // *Полимерные материалы и технологии*. 2018. Т. 4, № 3. С. 26–34. <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2018-4-3-26-34>
8. Shelestova V. A., Zhandarov S. F., Danchenko S. G., Grakovich P. N. Surface modification of carbon fiber by fluoropolymer in a low-temperature plasma // *Inorganic Materials: Applied Research*, 2015, vol. 6, no. 3, pp. 219–224. doi: 10.1134/S2075113315030107
9. Chang L., Friedrich K. Enhancement effect of nanoparticles on the sliding wear of short fiber-reinforced polymer composites: a critical discussion of wear mechanisms // *Tribology international*, 2010, vol. 43, no. 12, pp. 2355–2364.

- doi: 10.1016/j.triboint.2010.08.011
10. Chang L., Zhang Z. Tribological properties of epoxy nanocomposites: Part II. A combinative effect of short carbon fibre with nano-TiO<sub>2</sub> // *Wear*, 2006, vol. 260, no. 7–8, pp. 869–878. doi: 10.1016/j.wear.2005.04.002
  11. Vasilev A. P., Struchkova T. S., Nikiforov L. A., Okhlopkova A. A., Grakovich P. N., Shim E. L., Cho J. H. Mechanical and Tribological Properties of Polytetrafluoroethylene Composites with Carbon Fiber and Layered Silicate Fillers // *Molecules*, 2019, vol. 24, no. 2, pp. 224. doi: 10.3390/molecules24020224
  12. Авдейчик С. В. Машиностроительные фторкомпозицы: структура, технология, применение: монография / под ред. В. А. Струка. Гродно: ГрГУ им. Янки Купалы, 2012. 339 с.
  13. Hemanth R., Sekar M., Suresha B. Effects of fibers and fillers on mechanical properties of thermoplastic composites // *Indian Journal of Advances in Chemical Science*, 2014, vol. 2, pp. 28–35.
  14. Сиренко Г. А. Антифрикционные карбопластики. Киев: Техника, 1985. 196 с.
  15. Мышкин Н. К., Петроковец М. И., Ковалев А. В. Трибология полимеров: адгезия, трение, изнашивание и фрикционный перенос // *Трение и износ*. 2006. Т. 27, № 4. С. 429–443.
  16. Sleptsova S. A., Lazareva N. N., Fedoseeva V. I., Kapitonova Y. V., Okhlopkova A. A. The Influence of Metal Cations of Mechanoactivated Bentonite on Tribochemical Processes in PTFE // *Journal of Friction and Wear*, 2018, vol. 39, no. 6, pp. 469–475. doi: 10.3103/S1068366618060120
  17. Pitenis A. A., Harris K. L., Junk C. P., Blackman G. S., Sawyer W. G., Krick B. A. Ultralow wear PTFE and alumina composites: it is all about tribochemistry // *Tribology Letters*, 2015, vol. 57, no. 1, pp. 4. doi: 10.1007/s11249-014-0445-6
  18. Krick B. A., Ewin J. J., Blackman G. S., Junk C. P., Sawyer W. G. Environmental dependence of ultra-low wear behavior of polytetrafluoroethylene (PTFE) and alumina composites suggests tribochemical mechanisms // *Tribology International*, 2012, vol. 51, pp. 42–46. doi: 10.1016/j.triboint.2012.02.015
  19. Aderikha V. N., Krasnov A. P., Naumkin A. V., Shapovalov V. A. Effects of ultrasound treatment of expanded graphite (EG) on the sliding friction, wear resistance, and related properties of PTFE-based composites containing EG // *Wear*, 2017, vol. 386, pp. 63–71. doi: 10.1016/j.wear.2017.04.022
  20. Ohlopkova A. A., Struchkova T. S., Vasilev A. P., Alexeev A. G. Studying the properties and structure of polytetrafluoroethylene filled with Belum modified carbon fibers // *Journal of Friction and Wear*, 2016, vol. 37, no. 6, pp. 529–534. doi: 10.3103/S1068366616060118

## References

1. Luo W., Liu Q., Li Y., Zhou S., Zou H., Liang M. Enhanced mechanical and tribological properties in polyphenylene sulfide/polytetrafluoroethylene composites reinforced by short carbon fiber. *Composites Part B: Engineering*, 2016, vol. 91, pp. 579–588. doi: 10.1016/j.compositesb.2016.01.036
2. Sharma S., Bijwe J., Panier S. Exploration of potential of Zylon and Aramid fibers to enhance the abrasive wear performance of polymers. *Wear*, 2019, vol. 422, pp. 180–190. doi: 10.1016/j.wear.2019.01.068
3. Lyukshin B. A., Shil'ko S. V., Panin S. V., Mashkov Yu. K., Kormienko L. A., Lyukshin P. A., Pleskachevskiy Yu. M., Kropotin O. V., Bochkareva S. A., Matolygina M. Yu., Chernous D. A., Grishaeva N. Yu., Reutov Yu. A. Dispersno-napolnennyye polimernyye kompozity tekhnicheskogo i meditsinskogo naznacheniya [Disperse Filled Polymer Composites for Engineering and Medicine]. Novosibirsk: SO RAN Publ., 2017. 311 p.
4. Blanchet T. A., Kennedy F. E. Sliding wear mechanism of polytetrafluoroethylene (PTFE) and PTFE composites. *Wear*, 1992, vol. 153, no. 1, pp. 229–243. doi: 10.1016/0043-1648(92)90271-9
5. Zhang L., Zhang G., Chang L., Wetzel B., Jim B., Wang Q. Distinct tribological mechanisms of silica nanoparticles in epoxy composites reinforced with carbon nanotubes, carbon fibers and glass fibers. *Tribology International*, 2016, vol. 104, pp. 225–236. doi: 10.1016/j.triboint.2016.09.001
6. Grakovich P. N., Shelestova V. A., Ivanov L. F., Celuev M. Ju., Zhandarov S. F. Issledovanie struktury i svoystv granichnykh sloev v kompozitsionnykh materialakh na osnove PTFE [Investigation of structure and properties of boundary layers in composite materials with PTFE matrix]. *Polimernyye materialy i tekhnologii* [Polymer Materials and Technologies], 2017, vol. 3, no. 3, pp. 14–26. <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2017-3-3-14-26>
7. Ohlopkova A. A., Vasil'ev A. P., Struchkova T. S., Alexeev A. G., Grakovich P. N. Vliyanie uglerodnykh volokon i disulfida vol'frama na svoystva i strukturu politetrafluoretilena [Influence of carbon fibers and tungsten disulfide on the properties and structure of polytetrafluoroethylene]. *Polimernyye materialy i tekhnologii* [Polymer Materials and Technologies], 2018, vol. 4, no. 3, pp. 26–34. <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2018-4-3-26-34>
8. Shelestova V. A., Zhandarov S. F., Danchenko S. G., Grakovich P. N. Surface modification of carbon fiber by fluoropolymer in a low-temperature plasma. *Inorganic Materials: Applied Research*, 2015, vol. 6, no. 3, pp. 219–224. doi: 10.1134/S2075113315030107
9. Chang L., Friedrich K. Enhancement effect of nanoparticles on the sliding wear of short fiber-reinforced polymer composites: a critical discussion of wear mechanisms. *Tribology international*, 2010, vol. 43, no. 12, pp. 2355–2364. doi: 10.1016/j.triboint.2010.08.011
10. Chang L., Zhang Z. Tribological properties of epoxy nanocomposites: Part II. A combinative effect of short carbon fibre with nano-TiO<sub>2</sub>. *Wear*, 2006, vol. 260, no. 7–8, pp. 869–878. doi: 10.1016/j.wear.2005.04.002
11. Vasilev A. P., Struchkova T. S., Nikiforov L. A., Okhlopkova A. A., Grakovich P. N., Shim E. L., Cho J. H. Mechanical and Tribological Properties of Polytetrafluoroethylene Composites with Carbon Fiber and Layered Silicate Fillers. *Molecules*, 2019, vol. 24, no. 2, pp. 224. doi: 10.3390/molecules24020224
12. Avdejchik S. V. *Mashinostroitel'nye ftorkompozity: struktura, tekhnologiya, primenenie: monografija* [Engineering fluorocomposites: structure, technology, application: monograph]. Ed. V. A. Struk. Grodno: GrGU im. Janki Kupaly Publ., 2012. 339 p.
13. Hemanth R., Sekar M., Suresha B. Effects of fibers and fillers on mechanical properties of thermoplastic composites. *Indian Journal of Advances in Chemical Science*, 2014, vol. 2, pp. 28–35.
14. Сиренко Г. А. Антифрикционные карбопластики [Antifriction carboplastics]. Киев: Техника Publ., 1985. 196 p.
15. Мышкин Н. К., Петроковец М. И., Ковалев А. В. Трибология полимеров: адгезия, трение, изнашивание и фрикционный перенос [Tribology of polymers: adhesion, friction, wear, and friction transfer]. *Trenie i iznos* [Friction and Wear], 2006, vol. 27, no. 4, pp. 429–443.
16. Sleptsova S. A., Lazareva N. N., Fedoseeva V. I., Kapitonova Y. V., Okhlopkova A. A. The Influence of Metal Cations of Mechanoactivated Bentonite on Tribochemical Processes in PTFE. *Journal of Friction and Wear*, 2018, vol. 39, no. 6, pp. 469–475. doi: 10.3103/S1068366618060120
17. Pitenis A. A., Harris K. L., Junk C. P., Blackman G. S., Sawyer W. G., Krick B. A. Ultralow wear PTFE and alumina composites: it is all about tribochemistry. *Tribology Letters*, 2015, vol. 57, no. 1, pp. 4. doi: 10.1007/s11249-014-0445-6
18. Krick B. A., Ewin J. J., Blackman G. S., Junk C. P., Sawyer W. G. Environmental dependence of ultra-low wear behavior of polytetrafluoro-

- 
- roethylene (PTFE) and alumina composites suggests tribochemical mechanisms. *Tribology International*, 2012, vol. 51, pp. 42–46. doi: 10.1016/j.triboint.2012.02.015
19. Aderikha V. N., Krasnov A. P., Naumkin A. V., Shapovalov V. A. Effects of ultrasound treatment of expanded graphite (EG) on the sliding friction, wear resistance, and related properties of PTFE-based composites containing EG. *Wear*, 2017, vol. 386, pp. 63–71. doi: 10.1016/j.wear.2017.04.022
20. Ohlopkova A. A., Struchkova T. S., Vasilev A. P., Alexeev A. G. Studying the properties and structure of polytetrafluoroethylene filled with Belum modified carbon fibers. *Journal of Friction and Wear*, 2016, vol. 37, no. 6, pp. 529–534. doi: 10.3103/S1068366616060118
-