

<http://doi.org/10.32864/polymmattech-2025-11-2-6-21>

УДК 66.017

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ ПОЛИМЕР-СИЛИКАТНЫХ КОМПОЗИТОВ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА (ОБЗОР)

Н. Н. ЛАЗАРЕВА¹⁺, А. А. ОХЛОПКОВА¹, Ю. В. КАПИТОНОВА¹, П. Н. ТАРАСОВА¹, А. П. ВАСИЛЬЕВ¹, С. Н. ДАНИЛОВА¹, Е. Н. ВОЛНЯНКО²

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

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

Цель работы — анализ методов и технологических приемов использования слоистых силикатов в качестве наполнителей для разработки композитов триботехнического назначения на основе ПТФЭ.

В статье представлен обзор работ по применению слоистых силикатов в качестве наполнителей для политетрафторэтилена (ПТФЭ), а также для использования их в составе комбинированных наполнителей для композитов ПТФЭ триботехнического назначения. Приведен сравнительный анализ влияния слоистых силикатов на физико-механические свойства и триботехнические характеристики разработанных полимерных композиционных материалов. Рассмотрены способы модифицирования наполнителей с целью улучшения совместимости с полимерной матрицей: термообработка, механоактивация, обработка поверхностно-активными веществами. Также представлены способы совмещения наполнителей и полимерной матрицы: СВЧ-обработка, смешение в лопастном смесителе и планетарной мельнице. Показано, что технология механической активации слоистых силикатов является эффективным способом их модифицирования. Также показано, что комбинированное наполнение ПТФЭ минеральными слоистыми силикатами совместно с углеродными волокнами, углеродными нанотрубками и шпинелью магния открывает перспективы создания материалов с улучшенным комплексом свойств. Спектральными методами анализа изучены морфология и структура поверхностей трения исследуемых композиционных материалов. Рассмотрен механизм трибоокислительных процессов, протекающих при трении и изнашивании композитов с формированием вторичной структуры, защищающий материал от дальнейшего истирания. Разработанные композиты перспективны для применения в узлах трения техники, работающей в экстремальных условиях, включая низкие температуры.

Ключевые слова: триботехнические характеристики, износостойкость, механоактивация, каолинит, вермикулит, серпентин, сунгулит, галлуазит.

TECHNOLOGICAL FEATURES OF DEVELOPING POLYMER-SILICATE TRIBOLOGICAL COMPOSITES BASED ON POLYTETRAFLUOROETHYLENE (REVIEW)

N. N. LAZAREVA¹⁺, A. A. OKHLOPKOVA¹, I. V. KAPITONOVA¹, P. N. TARASOVA¹, A. P. VASILIEV¹, S. N. DANILOVA¹, E. N. VOLNYANKO²

¹North-Eastern Federal University, Belinsky St., 58, 677000, Yakutsk, Russia

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

The aim of this work is to analyze the methods and technological approaches for using layered silicates

⁺Автор, с которым следует вести переписку. E-mail: lazareva-nadia92@mail.ru

as fillers in the development of tribological composites based on polytetrafluoroethylene (PTFE).

This article provides an overview of research on the application of layered silicates as fillers for PTFE, as well as their use in combined filler systems for tribological PTFE composites. A comparative analysis of the influence of layered silicates on the physical-mechanical properties and tribological characteristics of the developed polymer composites is presented. The study examines various filler modification techniques—such as heat treatment, mechanical activation, and surfactant treatment. Additionally, it explores methods of combining fillers, including microwave treatment, mixing in a paddle mixer, and processing in a planetary mill. It is demonstrated that the mechanical activation of layered silicates is an effective approach to modifying them. Furthermore, the combined use of layered silicates with carbon fibers, carbon nanotubes, and magnesium spinel in PTFE filling shows promise for creating materials with enhanced properties. Detailed morphological and structural analyses of the friction surfaces of the studied composites have been studied with spectral analysis methods. The mechanism of tribooxidation processes occurring during friction and wear of composites with the formation of a secondary structure protecting the material from further abrasion is considered. The developed composites show potential for use in friction units of equipment operating under extreme conditions, including low temperatures.

Keywords: tribological properties, wear resistance, mechanical activation, kaolinite, vermiculite, serpentine, sungulite, halloysite.

Поступила в редакцию 17.04.2025

© Н. Н. Лазарева, А. А. Охлопкова, Ю. В. Капитонова, П. Н. Тарасова, А. П. Васильев, С. Н. Данилова, Е. Н. Волнянко, 2025

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
Web: <http://mpri.org.by/izdaniya/pmt/>

Образец цитирования:

Лазарева Н. Н., Охлопкова А. А., Капитонова Ю. В., Тарасова П. Н., Васильев А. П., Данилова С. Н., Волнянко Е. Н. Технологические особенности создания полимер-силикатных композитов триботехнического назначения на основе политетрафторэтилена (обзор) // Полимерные материалы и технологии. 2025. Т. 11, № 2. С. 6–21. <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2025-11-2-6-21>

Citation sample:

Lazareva N. N., Okhlopko A. A., Kapitonova Yu. V., Tarasova P. N., Vasil'ev A. P., Danilova S. N., Volnyanko E. N. Tekhnologicheskie osobennosti sozdaniya polimer-silikatnykh kompozitov tribotekhnicheskogo naznacheniya na osnove politetraftoretilyna (obzor) [Technological features of developing polymer-silicate tribological composites based on polytetrafluoroethylene (review)]. *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer Materials and Technologies], 2025, vol. 11, no. 2, pp. 6–21. <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2025-11-2-6-21>

Литература

1. Машков Ю. К., Овчар З. Н., Суриков В. И., Калистратова Л. Ф. Композиционные материалы на основе политетрафторэтилена. Структурная модификация. М.: Машиностроение, 2005. 239 с.
2. Бузник В.М., Василевич Н.И. Материалы для освоения арктических территорий – вызовы и решения // Лаборатория и производство. 2020. № 1 (11). С. 98–107.
3. Песецкий С. С., Богданович С. П., Мышкин Н. Л. Нанокompозиты, получаемые диспергированием слоистых силикатов в расплавах полимеров (обзор) // Полимерные материалы и технологии. 2015. Т. 1, № 1. С. 7–37.
4. Голубева О. Ю., Гусаров В. В. Слоистые силикаты со структурой монтмориллонита. Получение и перспективы применения для полимерных нанокompозитов // Физика и химия стекла. 2007. Т. 33, № 3. С. 334–340.
5. Mittal V. Polymer layered silicate nanocomposites: a review // *Materials*, 2009, vol. 2, pp. 992–1057. doi: 10.3390/ma2030992
6. Слепцова С. А., Лазарева Н. Н., Федосеева В. И., Капитонова Ю. В., Охлопкова А. А. Влияние катионов металлов механоактивиро-

- ванного бентонита на трибохимические процессы в ПТФЭ // Трение и износ. 2018. Т. 39, № 6. С. 604–611.
7. Слепцова С. А., Афанасьева Е. С., Григорьева В. П. Структура и триботехнические свойства политетрафторэтилена, модифицированного слоистыми силикатами // Трение и износ. 2009. Т. 30, № 6. С. 587–593.
 8. Слепцова С. А., Кириллина Ю. В. Разработка полимер-силикатных нанокомпозитов // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. 2013. Т. 10, № 2. С. 18–25.
 9. Слепцова С. А., Лазарева Н. Н., Капитонова Ю. В., Лаукканен Э. А. С., Афанасьева Е. С. Полимерные композиты на основе политетрафторэтилена и природных слоистых силикатов для уплотнительных устройств техники Севера // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2020. Т. 7, № 2. С. 170–176.
 10. Лазарева Н. Н., Слепцова С. А., Капитонова Ю. В., Охлопкова А. А., Москвитина Л. В. Разработка полимерных композитов на основе политетрафторэтилена и природной глины // Перспективные материалы. 2017. № 12. С. 39–50.
 11. Karitono I., Lazareva N., Tarasova P., Okhlopko A., Laukkanen S., Mukhin V. Morphology analysis of friction surfaces of composites based on PTFE and layered silicates // Polymers, 2022, vol. 14, no. 21. doi: 10.3390/polym14214658
 12. Лаптева Е. С., Юсупов Т. С., Бергер А. С. Физико-химические изменения слоистых силикатов в процессе механической активации. Новосибирск : Наука, 1981. 88 с.
 13. Булах А. Г. Общая минералогия. СПб.: СПбГУ, 1999. 356 с.
 14. Минералы : справочник : в 7 т. Т. 4, вып. 1 / гл. ред. Ф. В. Чухров. Москва : Изд-во АН СССР, 1992. 599 с.
 15. Механохимические явления при сверхтонком измельчении / ред. Кляровский В. И., Молчанов В. И. Новосибирск : [б. и.], 1971. 174 с.
 16. Аввакумов Е. Г., Гусев А. А. Механические методы активации в переработке природного и техногенного сырья. Новосибирск : Гео, 2009. 156 с.
 17. Охлопкова А. А., Адрианова О. А., Попов С. Н. Модификация полимеров ультрадисперсными соединениями. Якутск : СО РАН, 2003. 224 с.
 18. Охлопкова А. А., Виноградов А. В., Пинчук Л. С. Пластики, наполненные ультрадисперсными неорганическими соединениями. Гомель : ИММС НАНБ, 1999. 164 с.
 19. Охлопкова А. А. Физико-химические принципы создания триботехнических материалов на основе политетрафторэтилена и ультрадисперсных керамик : дис. д-ра техн. наук : 05.02.01; 05.02.04. Гомель, 2000. 295 с.
 20. Слепцова С. А. Исследование межфазного взаимодействия и разработка машиностроительных триботехнических материалов на основе политетрафторэтилена и ультрадисперсных керамик : дис. канд. техн. наук : 05.02.01. Якутск, 2000. 162 с.
 21. Слепцова С. А., Кириллина Ю. В., Лазарева Н. Н., Макаров М. М. Разработка и исследование полимерных композитов на основе политетрафторэтилена и слоистых силикатов // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова. 2015. № 6 (50). С. 95–104.
 22. Овчаренко Ф. Д. Гидрофильность глин и глинистых минералов. Киев : Академия наук УССР, 1961. 291 с.
 23. Лазарева Н. Н., Слепцова С. А., Афанасьева Е. С. Влияние на триботехнические свойства политетрафторэтилена вермикулита, модифицированного ПАВ // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2014. № 10. С. 28–31.
 24. Авдейчик С. В., Воробаев В. В., Скаскевич А. А., Струк В. А. Машиностроительные фторкомпозиты: структура, технология, применение. Гродно : ГрГУ им. Янки Купалы, 2012. 339 с.
 25. Кириллина Ю. В., Слепцова С. А., Хо-Чо Джин. Влияние способа смешения компонентов на свойства полимер-силикатного композиционного материала // Арктика XXI век. Технические науки. 2013. № 1. С. 13–26.
 26. Harper J. F., Price D. M., Zhang J. Microwave forming and welding of polymers // 10th International Conference on Microwave and High Frequency Heating : proceedings, Modena, 12–15 sept. 2005. Italia, 2005, pp. 298–301.
 27. Tsai C. C., Rubin B., Tatartschuk E., Owens J. R., Luzinov, I., Kornev, K. G. Efficiency of microwave heating of weakly loaded polymeric nanocomposites // Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 2012, vol. 7. doi: 10.1177/155892501200702S07
 28. Lazareva N. N., Sleptsova S. A., Okhlopko A. A., Kapitonova I. V. Development of tribotechnical materials based on PTFE with processing in the electromagnetic field of microwave radiation // AIP Conference Proceedings, 2018, vol. 2051. doi: 10.1063/1.5083411
 29. Калганова С. Г. Электротехнология нетепловой модификации полимерных материалов в СВЧ электромагнитном поле : автореф. дис. д-ра техн. наук : 05.09.10. Саратов, 2009. 32 с.
 30. Тарасова П. Н., Данилова С. Н., Охлопкова А. А., Лазарева Н. Н. Влияние механоактивированных каолинита и шпинели магния на триботехнические характеристики и структуру поверхностей трения ПТФЭ // Трение и износ. 2022. Т. 43, № 5. С. 476–483. doi: 10.32864/0202-4977-2022-43-5-476-483
 31. Слепцова С. А., Охлопкова А. А., Капитонова Ю. В., Лазарева Н. Н., Макаров М. М., Никифоров Л. А. Спектроскопические исследования трибоокислительных процессов модифицированного ПТФЭ // Трение и износ. 2016. Т. 37, № 2. С. 168–176.
 32. Капитонова Ю. В., Тарасова П. Н., Охлопкова А. А., Лазарева Н. Н. Трибохимические реакции, протекающие на поверхности трения композитов на основе ПТФЭ, наполненного слоистыми силикатами // Южно-Сибирский научный вестник. 2024. № 2 (54). С. 98–106.
 33. Тарасова П. Н., Капитонова Ю. В., Лазарева Н. Н., Охлопкова А. А., Канаева А. А., Кычкина Ю. В. Исследование влияния алюмосиликатов подгруппы каолинита на свойства и структуру политетрафторэтилена // Южно-сибирский научный вестник. 2024. Т. 57. № 5. С. 135–143.
 34. Тарасова П. Н., Слепцова С. А., Лаукканен С., Дьяконов А. А. Уплотнительные материалы на основе политетрафторэтилена для авиационной техники // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 1. С. 51–64. doi: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-51-64
 35. Машков Ю. К., Калистратова Л. Ф., Овчар З. Н. Структура и износостойкость модифицированного политетрафторэтилена. Омск : ОмГТУ, 1998. 143 с.
 36. Стручкова Т. С., Амвросьев Я. А. Исследование влияния nanoшпинели магния на структуру и свойства политетрафторэтилена // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2020. Т. 22, № 2. С. 47–50. doi: 10.37313/1990-5378-2020-22-2-47-50
 37. Охлопкова А. А., Стручкова Т. С., Васильев А. П., Алексеев А. Г. Исследование свойств и структуры политетрафторэтилена наполненного модифицированными углеродными волокнами “Белум” // Трение и износ. 2016. Т. 37, № 6. С. 704–711.
 38. Васильев А. П. Разработка полимерных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена с углеродными волокнами и природными наполнителями: каолином и вермикулитом : дис. канд. техн. наук : 05.17.06. Якутск, 2020. 155 с.
 39. Авдейчик С. В., Гольдаде В. А., Струк В. А., Антонов А. С., Икромов А. Г. Реализация феномена наносостояния в материаловедении функциональных нанокомпозитов на основе промышленных полимеров // Электронная обработка материалов. 2021. Т. 57, № 1. С. 7–18.
 40. Стручкова Т. С. Разработка и исследование полимерных композиционных материалов на основе активации политетрафторэтилена и углеродных наполнителей : дис. канд. техн. наук : 05.02.01. Комсомольск-на-Амуре, 2008. 115 с.
 41. Охлопкова А. А., Стручкова Т. С., Алексеев А. Г., Васильев А. П. Разработка и исследование полимерных композиционных материалов на основе активации политетрафторэтилена и углеродных наполнителей // Вестник Северо-Восточного федерального уни-

- верситета им. М.К. Аммосова. 2015. № 4 (48). С. 51–63.
42. 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. doi: 10.3390/molecules24020224
 43. Охлопкова А. А., Васильев А. П., Стручкова Т. С., Алексеев А. Г., Гракович П. Н. Влияние углеродных волокон и бентонита на триботехнические характеристики ПТФЭ // *Трение и износ*. 2020. Т. 41, № 6. С. 768–775. doi: 10.32864/0202-4977-2020-41-6-768-775
 44. Lazareva N. N., Khristoforova R. E., Vasilev A. P., Arkhipova T. I., Danilova S. N., Okhlopkova A. A. An investigation on enhancing the wear resistance of PTFE-based composites through complex fillers incorporating a combination of kaolinite and single-walled carbon nanotubes // *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 2024, vol. 63, is. 10, pp. 1306–1318. doi: 10.1080/25740881.2024.2329962
 45. Harris K. L., Pitenis A. A., Sawyer W. G., Krick B. A., Blackman G. S., Kasprzak D. J., Junk C. P. PTFE tribology and the role of mechanochemistry in the development of protective surface films // *Macromolecules*, 2015, vol. 48, no. 11, pp. 3739–3745. doi: 10.1021/acs.macromol.5b00452
 46. Biswas S. K., Vijayan K. Friction and wear of PTFE — a review // *Wear*, 1992, vol. 158, no. 1-2, pp. 193–211. doi: 10.1016/0043-1648(92)90039-B
 47. Tanaka K., Uchiyama Y., Toyooka S. The mechanism of wear of polytetrafluoroethylene // *Wear*, 1973, vol. 23, no. 2, pp. 153–172. doi: 10.1016/0043-1648(73)90081-1
 48. 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
 49. Gao J. T. Tribochemical Effects in Formation of Polymer Transfer Film // *Wear*, 2000, vol. 245, no. 1-2, pp. 100–106. doi: 10.1016/S0043-1648(00)00470-1
 50. Физика взрыва : в 2 т. Т. 2 / под ред. Л. П. Орленко. М. : Физматлит, 2002. 656 с.
 51. Краснов А. П. Трибохимические процессы и разработка износостойких материалов на основе ароматических полимеров : автореф. дис. д-ра хим. наук : 02.00.06. Москва, 1988. 40 с.
 52. Никольский А. В., Козаков А. Т., Кравченко В. Н. Динамика изменения химического состояния поверхностей трения металлополимерного сопряжения в процессе фрикционного взаимодействия // *Трение и износ*. 1988. Т. 9, № 5. С. 860–869.
 53. Сычев В. В. Исследование влияния термической и термоокислительной деструкции полимеров на процессы трения и изнашивания и использования ее для разработки смазок и антифрикционных материалов : автореф. дис. канд. техн. наук: 05.02.04. Ростов-на-Дону, 1975. 23 с.

References

1. Mashkov Yu. K., Ovchar Z. N., Surikov V. I., Kalistratova L. F. *Kompozitsionnye materialy na osnove politetrafluoretilena. Strukturnaya modifikatsiya* [Composite materials based on polytetrafluoroethylene. Structural modification]. Moscow : Mashinostroenie Publ., 2005. 239 p.
2. Buznik V.M., Vasilevich N.I. *Materialy dlya osvoeniya arkticheskikh territoriy – vyzovy i resheniya* [Materials for the Development of Arctic Territories – Challenges and Solutions]. *Laboratoriya i proizvodstvo* [Laboratory and production], 2020, no. 1 (11), pp. 98–107.
3. Pesetskiy S. S., Bogdanovich S. P., Myshkin N. L. Nanokompozity, poluchaemye dispergировaniem sloistykh silikatov v rasplavakh polimerov (obzor) [Nanocomposites Obtained by Dispersing Layered Silicates in Polymer Melts (Review)]. *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer Materials and Technologies], 2015, vol. 1, no. 1, pp. 7–37.
4. Golubeva O. Yu., Gusarov V. V. Sloistye silikaty so strukturoy montmorillonita. Poluchenie i perspektivy primeneniya dlya polimernykh nanokompozitov [Layered silicates with montmorillonite structure. Production and application prospects for polymer nanocomposites]. *Fizika i khimiya stekla* [Glass Physics and Chemistry], 2007, vol. 33, no. 3, pp. 334–340.
5. Mittal V. Polymer layered silicate nanocomposites: a review. *Materials*, 2009, vol. 2, pp. 992–1057. doi: 10.3390/ma2030992
6. Sleptsova S. A., Lazareva N. N., Fedoseeva V. I., Kapitonova Yu. V., Okhlopkova A. A. Vliyanie kationov metallov mekhanooaktivirovannogo bentonita na tribokhimicheskie protsessy v PTFE [The influence of metal cations of mechanically activated bentonite on tribochemical processes in PTFE]. *Trenie i iznos* [Friction and Wear], 2018, vol. 39, no. 6, pp. 604–611.
7. Sleptsova S. A., Afanas'eva E. S., Grigor'eva V. P. Struktura i tribotekhnicheskie svoystva politetrafluoretilena, modifitsirovannogo sloistymi silikatami [Structure and Tribological behavior of Polytetrafluoroethylene Modified with Layered Silicates]. *Trenie i iznos* [Friction and Wear], 2009, vol. 30, no. 6, pp. 587–593.
8. Sleptsova S. A., Kirillina Yu. V. Razrabotka polimer-silikatnykh nanokompozitov [Elaboration of polymer-silicate nanocomposites]. *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. M.K. Ammosova* [Vestnik of North-Eastern Federal University], 2013, vol. 10, no. 2, pp. 18–25.
9. Sleptsova S. A., Lazareva N. N., Kapitonova Yu. V., Laukkanen E. A. S., Afanas'eva E. S. Polimernye kompozity na osnove politetrafluoretilena i prirodnykh sloistykh silikatov dlya uplotnitel'nykh ustroystv tekhniki Severa [Polymer composites based on polytetrafluoroethylene and natural layered silicates for sealing devices of Northern technology]. *Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornykh nauk* [Fundamental and applied issues of mining sciences], 2020, vol. 7, no. 2, pp. 170–176.
10. Lazareva N. N., Sleptsova S. A., Kapitonova Yu. V., Okhlopkova A. A., Moskvitina L. V. Razrabotka polimernykh kompozitov na osnove politetrafluoretilena i prirodnoy gliny [Development of polymer composites based on polytetrafluoroethylene and natural clay]. *Perspektivnye materialy* [Journal of Advanced Materials], 2017, no. 12, pp. 39–50.
11. Kapitonova I., Lazareva N., Tarasova P., Okhlopkova A., Laukkanen S., Mukhin V. Morphology analysis of friction surfaces of composites based on PTFE and layered silicates. *Polymers*, 2022, vol. 14, no. 21. doi: 10.3390/polym14214658
12. Lapteva E. S., Yusupov T. S., Berger A. S. *Fiziko-khimicheskie izmeneniya sloistykh silikatov v protsesse mekhanicheskoy aktivatsii* [Physical and chemical changes of layered silicates during mechanical activation]. Novosibirsk : Nauka Publ., 1981. 88 p.
13. Bulakh A. G. *Obshchaya mineralogiya* [General Mineralogy]. Saint-Petersburg : SpbGU Publ., 1999. 356 p.
14. *Mineraly : spravochnik* [Minerals. Handbook.]. Ed. F. V. Chukhrov. Moscow : Izd-vo AN SSSR Publ., 1992, vol. 4, is. 1. 599 p.
15. *Mekhanokhimicheskie yavleniya pri sverkhtonkom izmel'chenii* [Mechanochemical phenomena during ultrafine grinding]. Eds. Klyarovskiy V. I., Molchanov V. I. Novosibirsk, 1971. 174 p.
16. Avvakumov E. G., Gusev A. A. *Mekhanicheskie metody aktivatsii v pererabotke prirodnoy i tekhnogennogo syr'ya* [Mechanical methods of activation in processing of natural and technogenic raw materials]. Novosibirsk : Geo Publ., 2009. 156 p.
17. Okhlopkova A. A., Adrianova O. A., Popov S. N. *Modifikatsiya polimerov ul'tradispersnyimi soedineniyami* [Modification of polymers with ultradisperse compounds]. Yakutsk : SO RAN Publ., 2003. 224 p.
18. Okhlopkova A. A., Vinogradov A. V., Pinchuk L. S. *Plastiki, napolnennye ul'tradispersnyimi neorganicheskimi soedineniyami* [Plastics filled with ultradispersed inorganic compounds]. Gorn' : IMMS NANB Publ., 1999. 164 p.
19. Okhlopkova A. A. *Fiziko-khimicheskie printsipy sozdaniya tribotekhnicheskikh materialov na osnove politetrafluoretilena i ul'tradispersnykh*

- keramik. Diss. dokt. tekhn. nauk [Physicochemical principles of creation of tribotechnical materials based on polytetrafluoroethylene and ultradisperse ceramics. Dr. eng. sci. diss.]. Gorn'ye, 2000. 295 p.
20. Sleptsova S. A. Issledovanie mezhfaznogo vzaimodeystviya i razrabotka mashinostroitel'nykh tribotekhnicheskikh materialov na osnove politetraftoretilena i ul'tradispersnykh keramik. Diss. kand. tekhn. nauk [Study of interphase interaction and development of mechanical engineering tribotechnical materials based on polytetrafluoroethylene and ultradisperse ceramics. PhD eng. sci. diss.]. Yakutsk, 2000. 162 p.
 21. Sleptsova S. A., Kirillina Yu. V., Lazareva N. N., Makarov M. M. Razrabotka i issledovanie polimernykh kompozitov na osnove politetraftoretilena i sloistykh silikatov [Development and research of polymer composites based on polytetrafluoroethylene and layered silicates]. *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. M. K. Ammosova* [Vestnik of North-Eastern Federal University], 2015, no. 6 (50), pp. 95–104.
 22. Ovcharenko F. D. *Gidrofil'nost' glin i glinistykh mineralov* [Hydrophilicity of clays and clay minerals]. Kiev : Akademiya nauk USSR Publ., 1961. 291 p.
 23. Lazareva N. N., Sleptsova S. A., Afanas'eva E. S. Vliyanie na tribotekhnicheskie svoystva politetraftoretilena vermikulita, modifitsirovannogo PAV [Influence of vermiculite modified by surfactant on tribological properties of polytetrafluoroethylene]. *Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmakh* [Friction and lubrication in machines and mechanisms], 2014, no. 10, pp. 28–31.
 24. Avdeychik S. V., Voropaev V. V., Skaskevich A. A., Struk V. A. *Mashinostroitel'nye ftorkompozity: struktura, tekhnologiya, primeneniye* [Mechanical engineering fluorocomposites: structure, technology, application]. Grodno : GrGU Publ., 2012. 339 p.
 25. Kirillina Yu. V., Sleptsova S. A., Kho-Cho Dzhin. Vliyanie sposoba smesheniya komponentov na svoystva polimer-silikatnogo kompozitsionnogo materiala [Influence of the method of mixing components on the properties of polymer-silicate composite material]. *Arktika XXI vek. Tekhnicheskie nauki* [Arctic 21st century. Technical sciences], 2013, no. 1, pp. 13–26.
 26. Harper J. F., Price D. M., Zhang J. Microwave forming and welding of polymers. *10th International Conference on Microwave and High Frequency Heating*, Modena, 12–15 sept. 2005. Italia, 2005, pp. 298–301.
 27. Tsai C. C., Rubin B., Tatartschuk E., Owens J. R., Luzinov, I., Kornev, K. G. Efficiency of microwave heating of weakly loaded polymeric nanocomposites. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 2012, vol. 7. doi: 10.1177/155892501200702S07
 28. Lazareva N. N., Sleptsova S. A., Okhlopova A. A., Kapitonova I. V. Development of tribotechnical materials based on PTFE with processing in the electromagnetic field of microwave radiation. *AIP Conference Proceedings*, 2018, vol. 2051. doi: 10.1063/1.5083411
 29. Kalganova S. G. Elektrotekhnologiya neteplovoiy modifikatsii polimernykh materialov v SVCh elektromagnitnom pole Avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk [Electrotechnology of non-thermal modification of polymeric materials in a microwave electromagnetic field. Dr. eng. sci. diss. abstract]. Saratov, 2009. 32 p.
 30. Tarasova P. N., Danilova S. N., Okhlopova A. A., Lazareva N. N. Vliyanie mekhanoaktivirovannykh kaolinita i shpineli magniya na tribotekhnicheskie kharakteristiki i strukturu poverkhnostey treniya PTFE [The influence of mechanically activated kaolinite and magnesium spinel on tribological properties and structure of PTFE friction surfaces]. *Trenie i iznos* [Friction and Wear], 2022, vol. 43, no. 5, pp. 476–483. doi: 10.32864/0202-4977-2022-43-5-476-483
 31. Sleptsova S. A., Okhlopova A. A., Kapitonova Yu. V., Lazareva N. N., Makarov M. M., Nikiforov L. A. Spektroskopicheskie issledovaniya tribookislitel'nykh protsessov modifitsirovannogo PTFE [Spectroscopic study of tribooxidation processes in modified PTFE]. *Trenie i iznos* [Friction and Wear], 2016, vol. 37, no. 2, pp. 168–176.
 32. Kapitonova Yu. V., Tarasova P. N., Okhlopova A. A., Lazareva N. N. Tribokhimicheskie reaktsii, protekayushchie na poverkhnosti treniya kompozitov na osnove PTFE, napolnennogo sloistymi silikatami [Tribochemical reactions occurring on the friction surface of composites based on PTFE filled with layered silicates]. *Yuzhno-Sibirskiy nauchnyy vestnik* [South-Siberian Scientific Bulletin], 2024, no. 2 (54), pp. 98–106.
 33. Tarasova P. N., Kapitonova Yu. V., Lazareva N. N., Okhlopova A. A., Kanaeva A. A., Kychkina Yu. V. Issledovanie vliyaniya alyumosilikatov podgruppy kaolinita na svoystva i strukturu politetraftoretilena [Study of the influence of aluminosilicates of the kaolinite subgroup on the properties and structure of polytetrafluoroethylene]. *Yuzhno-sibirskiy nauchnyy vestnik* [South-Siberian Scientific Bulletin], 2024, vol. 57, no. 5, pp. 135–143.
 34. Tarasova P. N., Sleptsova S. A., Laukkanen S., D'yakonov A. A. Uplotnitel'nye materialy na osnove politetraftoretilena dlya aviatsionnoy tekhniki [Sealing materials based on polytetrafluoroethylene for aviation products]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2022, no. 1, pp. 51–64. doi: 10.18577/2713-0193-2022-0-1-51-64
 35. Mashkov Yu. K., Kalistratova L. F., Ovchar Z. N. *Struktura i iznosostoykost' modifitsirovannogo politetraftoretilena* [Structure and wear resistance of modified polytetrafluoroethylene]. Omsk : OmGTU Publ., 1998. 143 p.
 36. Struchkova T. S., Amvros'ev Ya. A. Issledovanie vliyaniya nanoshpineli magniya na strukturu i svoystva politetraftoretilena [Study of the influence of magnesium nanospinel on the structure and properties of polytetrafluoroethylene]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Science], 2020, vol. 22, no. 2, pp. 47–50. doi: 10.37313/1990-5378-2020-22-2-47-50
 37. Okhlopova A. A., Struchkova T. S., Vasil'ev A. P., Alekseev A. G. Issledovanie svoystv i struktury politetraftoretilena napolnennogo modifitsirovannyimi uglerodnymi voloknami "Belum" [Studying the properties and structure of polytetrafluoroethylene filled with Belum modified carbon fibers]. *Trenie i iznos* [Friction and Wear], 2016, vol. 37, no. 6, pp. 704–711.
 38. Vasil'ev A. P. Razrabotka polimernykh kompozitsionnykh materialov na osnove politetraftoretilena s uglerodnymi voloknami i prirodnyimi napolnitelyami: kaolinom i vermikulitom. Diss. kand. tekhn. nauk [Development of polymer composite materials based on polytetrafluoroethylene with carbon fibers and natural fillers: kaolin and vermiculite. PhD eng. sci. diss.]. Yakutsk, 2020. 155 p.
 39. Avdeychik S. V., Gol'dade V. A., Struk V. A., Antonov A. S., Ikromov A. G. Realizatsiya fenomena nanosostoyaniya v materialovedenii funktsional'nykh nanokompozitov na osnove promyshlennykh polimerov [Implementation of the phenomenon of nanostate in materials science of functional nanocomposites based on industrial polymers]. *Elektronnaya obrabotka materialov* [Surface Engineering and Applied Electrochemistry], 2021, vol. 57, no. 1, pp. 7–18.
 40. Struchkova T. S. Razrabotka i issledovanie polimernykh kompozitsionnykh materialov na osnove aktivatsii politetraftoretilena i uglerodnykh napolniteley. Diss. kand. tekhn. nauk [Development and study of polymer composite materials based on the activation of polytetrafluoroethylene and carbon fillers. PhD eng. sci. diss.]. Komsomol'sk-na-Amure, 2008. 115 p.
 41. Okhlopova A. A., Struchkova T. S., Alekseev A. G., Vasil'ev A. P. Razrabotka i issledovanie polimernykh kompozitsionnykh materialov na osnove aktivatsii politetraftoretilena i uglerodnykh napolniteley [Development and study of polymer composite materials based on the activation of polytetrafluoroethylene and carbon fillers]. *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. M.K. Ammosova* [Vestnik of North-Eastern Federal University], 2015, no. 4 (48), pp. 51–63.
 42. Vasilev A. P., Struchkova T. S., Nikiforov L. A., Okhlopova 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. doi: 10.3390/molecules24020224
 43. Okhlopova A. A., Vasil'ev A. P., Struchkova T. S., Alekseev A. G., Grakovich P. N. Vliyanie uglerodnykh volokon i bentonita na tribotekhnicheskie kharakteristiki PTFE [Study of the Influence of Carbon Fibers and Bentonite on the Tribological Properties of PTFE]. *Trenie i iznos* [Friction and Wear], 2020, vol. 41, no. 6, pp. 768–775. doi: 10.32864/0202-4977-2020-41-6-768-775

44. Lazareva N. N., Khristoforova R. E., Vasiliev A. P., Arkhipova T. I., Danilova S. N., Okhlopkova A. A. An investigation on enhancing the wear resistance of PTFE-based composites through complex fillers incorporating a combination of kaolinite and single-walled carbon nanotubes. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 2024, vol. 63, is. 10, pp. 1306–1318. doi: 10.1080/25740881.2024.2329962
 45. Harris K. L., Pitenis A. A., Sawyer W. G., Krick B. A., Blackman G. S., Kasprzak D. J., Junk C. P. PTFE tribology and the role of mechanochemistry in the development of protective surface films. *Macromolecules*, 2015, vol. 48, no. 11, pp. 3739–3745. doi: 10.1021/acs.macromol.5b00452
 46. Biswas S. K., Vijayan K. Friction and wear of PTFE — a review. *Wear*, 1992, vol. 158, no. 1-2, pp. 193–211. doi: 10.1016/0043-1648(92)90039-B
 47. Tanaka K., Uchiyama Y., Toyooka S. The mechanism of wear of polytetrafluoroethylene. *Wear*, 1973, vol. 23, no. 2, pp. 153–172. doi: 10.1016/0043-1648(73)90081-1
 48. 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
 49. Gao J. T. Tribochemical Effects in Formation of Polymer Transfer Film. *Wear*, 2000, vol. 245, no. 1-2, pp. 100–106. doi: 10.1016/S0043-1648(00)00470-1
 50. Физика взрыва [Physics of Explosion]. Ed. L. P. Orlenko. Moscow : Fizmatlit Publ., 2002, vol. 2. 656 p.
 51. Krasnov A. P. Tribokhimicheskie protsessy i razrabotka iznosostoykikh materialov na osnove aromaticheskikh polimerov. Avtoref. diss. dokt. khim. nauk [Tribochemical processes and development of wear-resistant materials based on aromatic polymers. Dr. chem. sci. diss. abstract]. Moscow, 1988. 40 p.
 52. Nikol'skiy A. V., Kozakov A. T., Kravchenko V. N. Dinamika izmeneniya khimicheskogo sostoyaniya poverkhnostey treniya metallopolimernogo sopryazheniya v protsesse friktsionnogo vzaimodeystviya [Dynamics of changes in the chemical state of friction surfaces of metal-polymer mating during frictional interaction]. *Trenie i iznos* [Friction and Wear], 1988, vol. 9, no. 5, pp. 860–869.
 53. Sychev V. V. Issledovanie vliyaniya termicheskoy i termookislitel'noy destruktzii polimerov na protsessy treniya i iznashivaniya i ispol'zovaniya ee dlya razrabotki smazok i antifriktsionnykh materialov. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Study of the influence of thermal destruction of polymers on friction and wear processes and its use for the development of lubricants and antifriction materials. PhD eng. sci. diss. abstract]. Rostov-na-Donu, 1975. 23 p.
-