

<http://doi.org/10.32864/polymmattech-2024-10-4-6-19>

УДК 691.175.2

## ПОЛИМЕР-СИЛИКАТНЫЕ КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА (ОБЗОР)

А. А. ОХЛОПКОВА, Н. Н. ЛАЗАРЕВА<sup>+</sup>, Ю. В. КАПИТОНОВА, П. Н. ТАРАСОВА, А. П. ВАСИЛЬЕВ, С. Н. ДАНИЛОВА, Р. В. БОРИСОВА

Северо-Восточный федеральный университет имени М. К. Аммосова, ул. Кулаковского, 48, 677013, г. Якутск, Россия

*Цель работы — систематизация результатов исследований по созданию полимерных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена, содержащих слоистые силикаты.*

*Показана эффективность применения слоистых силикатов для модификации полимерных матриц. Согласно приведенным исследованиям при введении слоистых силикатов в полимер возможно образование трех видов структур композитов: фазоворазделенные, интеркалированные, эксфолированные. Получение таких структур зависит от полимерной матрицы, вида слоистого силиката и их взаимодействия.*

*В статье систематизированы результаты исследований по технологии совмещения политетрафторэтилена и слоистых силикатов, специфике совмещения гидрофильных слоистых силикатов с гидрофобной полимерной матрицей, особенностям структуры композитов, получаемых методом холодного прессования. Показана перспективность применения механической активации слоистых силикатов с целью оптимизации взаимодействия с полимерной матрицей. Режимы механоактивации, при которых частицы максимально диспергируются, для каждого слоистого силиката подбирают индивидуально в зависимости от структуры и типа частиц. Установлено улучшение износостойкости политетрафторэтилена при сохранении на высоком уровне деформационно-прочностных характеристик при использовании механоактивированных слоистых силикатов.*

**Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы, политетрафторэтилен, слоистые силикаты, органомодифицирование, механическая активация.

## POLYMER-SILICATE COMPOSITES BASED ON POLYTETRAFLUOROETHYLENE (REVIEW)

A. A. OKHLOPKOVA, N. N. LAZAREVA<sup>+</sup>, YU. V. KAPITONOVA, P. N. TARASOVA, A. P. VASILEV, S. N. DANILOVA, R. V. BORISOVA

North-Eastern Federal University, Kulakovskii St., 48, 677013, Yakutsk, Russia.

*The aim of the work is to systematize the results of research on the development of polymer composite materials based on polytetrafluoroethylene (PTFE) containing layered silicates.*

*The efficiency of layered silicates application for modification of polymer matrices is demonstrated. According to the presented studies, three types of composite structures can be formed when layered silicates are introduced into a polymer: phase-separated, intercalated, and exfoliated. The formation of such structures depends on the polymer matrix, the type of layered silicate and their interaction.*

*The article systematizes the results of research on the technology of combining polytetrafluoroethylene and layered silicates, the specifics of combining hydrophilic layered silicates with a hydrophobic polymer matrix, and the structural features of composites obtained by cold pressing. In addition, the prospects of using mechanical activation of layered silicates in order to optimize interaction with the polymer matrix are shown. It is established that the modes of mechanical activation (at which maximum dispersion of particles is*

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

achieved) are selected for each layered silicate individually depending on their structure and type. Improvement of polytetrafluoroethylene wear resistance is recorded while maintaining high deformation and strength characteristics when using mechanically activated layered silicates.

**Keywords:** polymer composite materials, polytetrafluoroethylene, layered silicates, organomodification, mechanical activation.

Поступила в редакцию 28.11.2024

© А. А. Охлопкова, Н. Н. Лазарева, Ю. В. Капитонова, П. Н. Тарасова, А. П. Васильев, С. Н. Данилова, Р. В. Борисова, 2024

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:

Охлопкова А. А., Лазарева Н. Н., Капитонова Ю. В., Тарасова П. Н., Васильев А. П., Данилова С. Н., Борисова Р. В. Полимер-силикатные композиты на основе политетрафторэтилена (обзор) // Полимерные материалы и технологии. 2024. Т. 10, № 4. С. 6–19. <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2024-10-4-6-19>

### Citation sample:

Okhlopkova A. A., Lazareva N. N., Kapitonova Yu. V., Tarasova P. N., Vasil'ev A. P., Danilova S. N., Borisova R. V. Polimer-silikatnye kompozity na osnove politetraftoretilena (obzor) [Polymer-silicate composites based on polytetrafluoroethylene (review)]. *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer Materials and Technologies], 2024, vol. 10, no. 4, pp. 6–19. <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2024-10-4-6-19>

### Литература

1. Пророкова Н. П., Бузник В. М. Модифицирование синтетических волокнистых материалов с использованием фторполимеров (обзор) // Полимерные материалы и технологии. 2017. Т. 3, № 2. С. 6–17.
2. Песецкий С. С., Богданович С. П., Мышкин Н. К. Нанокompозиты, получаемые диспергированием слоистых силикатов в расплавах полимеров (обзор) // Полимерные материалы и технологии. 2015. Т. 1, № 1. С. 7–37.
3. Alexandre M., Dubois P. Polymer-layered silicate nanocomposites: preparation, properties and uses of a new class of materials // *Materials Science and Engineering*, 2000, vol. 28, pp. 1–63. doi: 10.1016/S0927-796X(00)00012-7
4. Patent 4739007 USA, C08L77/02, C08K3/34. Composite material and process for manufacturing same / Okada A., Fukushima A., Kawasumi M., Inagaki S., Usuki A., Sugiyama S., Kurauchi T., Kamigaito O.; Assignee: Kabushiki Kaisha Toyota Chou Kenkyusho. N 909,472; appl. 19.09.1986; publ. 19.04.1988. 9 p.
5. Giannelis E. P. Polymer layered silicate nanocomposites // *Advanced materials*, 1996, vol. 8, no. 1, pp. 29–35. doi: 10.1002/adma.19960080104
6. Кудина Е. Ф. Органосиликатные материалы (обзор) // *Материалы, технологии, инструменты*. 2013. Т. 18, № 4. С. 31–42.
7. D'Aquino R. L. A little clay goes a long way // *Chemical Engineering*, 1999, vol. 106, no. 7, pp. 38–40.
8. Герасин В. А., Зубова Т. А., Бахов Ф. Н., Баранников А. А., Меркалова Н. Д., Королев Ю. М., Антипов Е. М. Структура нанокompозитов полимер/Na<sup>+</sup>-монтмориллонит, полученных смешением в расплаве // *Российские нанотехнологии*. 2007. Т. 2, № 1-2. С. 90–105.
9. Messersmith P. B., Giannelis E. P. Synthesis and barrier properties of poly ( $\epsilon$ -caprolactone)-layered silicate nanocomposites // *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 1995, vol. 33, is. 7, pp. 1047–1057. doi: 10.1002/pola.1995.080330707
10. Xie W., Gao Z., Liu K., Pan W.P., Vaia R., Hunter D., Singh, A. Thermal characterization of organically modified montmorillonite // *Thermochimica Acta*, 2001, vol. 367-368, pp. 339–350. doi: 10.1016/S0040-6031(00)00690-0
11. Solomon M. J., Almusallam A. S., Seefeldt K. F., Somwangthanaroj A., Varadan P. Rheology of polypropylene/clay hybrid materials // *Macromolecules*, 2001, vol. 34, is. 6, pp. 1864–1872. doi: 10.1021/ma001122e
12. Krishnamoorti R., Giannelis E. P. Rheology of end-tethered polymer layered silicate nanocomposites // *Macromolecules*, 1997, vol. 30, is. 14, pp. 4097–4102. doi: 10.1021/ma960550a
13. Pegoretti A., Kolarik, J., Peroni C., Migliaresi C. Recycled poly (ethylene terephthalate)/layered silicate nanocomposites: morphology and tensile mechanical properties // *Polymer*, 2004, vol. 45, is. 8, pp. 2751–2759. doi: 10.1016/j.polymer.2004.02.015
14. Motamedi P., Bagheri R. Investigation of the nanostructure and mechanical properties of polypropylene/polyamide 6/layered silicate ternary nanocomposites // *Materials & Design*, 2010, vol. 31, is. 4, pp. 1776–1784. doi: 10.1016/j.matdes.2009.11.013

15. Yu K., Shang X., Fu L., Zuo X., Yang H. Clay minerals regulating the performance of tribo-composites: A review // *Green and Smart Mining Engineering*, 2024, vol. 1, is. 2, pp. 220–240. doi: 10.1016/j.gsme.2024.06.002
16. 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, is. 2. doi: 10.3390/molecules24020224
17. 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, is. 21. doi: 10.3390/polym14214658
18. Singh V., Raja P., Katiyar J. K., Ramkumar P. Effect of friction modifiers compositions on tribological properties of Cu-Sn alloy/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> brake composite material // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2021, vol. 235, is. 8, pp. 1541–1550. doi: 10.1177/1350650120974132
19. Saha D., Satapathy B. K. Influence of various types of clays on velocity dependence of friction composites // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2021, vol. 235, is. 11, pp. 2415–2431. doi: 10.1177/13506501211002312
20. Abdel-Latif M. M., El-Tayeb N. S., Mahale V., Bijwe J. The effect of wollastonite silane-treatment on mechanical and tribological performance of NAO brake-pads // *International Journal of Surface Science and Engineering*, 2019, vol. 13, no. 4, pp. 293–316. doi: 10.1504/IJSURFSE.2019.103936
21. Goettler L. A., Lee K. Y., Thakkar H. Layered silicate reinforced polymer nanocomposites: development and applications // *Polymer Reviews*, 2007, vol. 47, no. 2, pp. 291–317. doi: 10.1080/15583720701271328
22. Layered mineral structures and their application in advanced technologies / eds.: M. F. Brigatti, A. Mottana. London : EMU Notes in Mineralogy, 2011. 376 p. doi: 10.1180/EMU-notes.11
23. Wenk H. R., Bulakh A. Minerals: their constitution and origin. Cambridge ; New York : Cambridge University Press, 2004. xxii, 646 p.
24. Liebau F. Classification of silicates // *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 1980, vol. 5, no. 1, pp. 1–24.
25. Maiti P., Yamada K., Okamoto M., Ueda K., Okamoto K. New polylactide/layered silicate nanocomposites: role of organoclays // *Chemistry of materials*, 2002, vol. 14, is. 11, pp. 4654–4661. doi: 10.1021/cm020391b
26. Песецкий С. С., Богданович С. П., Мышкин Н. К. Нанокompозиты, получаемые диспергированием наночастиц в расплавах полимеров: получение, свойства, применение // *Наноструктурные материалы: Беларусь - Россия - Украина. Нано-2014 : сборник пленарных докладов IV Международной научной конференции (Минск, 7–10 октября 2014 г.)* Минск : Белорусская наука, 2015. С. 241–254.
27. Песецкий С. С., Богданович С. П., Мышкин Н. К. Триботехнические свойства нанокompозитов, получаемых диспергированием наполнителей в расплавах полимеров // *Трение и износ*. 2007. Т. 28, № 5. С. 500–524.
28. Ke Y. C., Stroeve P. Polymer-layered silicate and silica nanocomposites. Netherlands : Elsevier, 2005. 398 p.
29. Jia Z., Yang Y. Self-lubricating properties of PTFE/serpentine nanocomposite against steel at different loads and sliding velocities // *Composites Part B: Engineering*, 2012, vol. 43, is. 4, pp. 2072–2078. doi: 10.1016/j.compositesb.2012.01.014
30. Jia Z. N., Yang Y. L., Chen J. J., Yu X. J. Influence of serpentine content on tribological behaviors of PTFE/serpentine composite under dry sliding condition // *Wear*, 2010, vol. 268, is. 7–8, pp. 996–1001. doi: 10.1016/j.wear.2009.12.009
31. Jia Z. N., Hao C. Z., Yang Y. L. Tribological performance of hybrid PTFE/serpentine composites reinforced with nanoparticles // *Tribology-Materials, Surfaces & Interfaces*, 2014, vol. 8, is. 3, pp. 139–145. doi: 10.1179/1751584X13Y.0000000058
32. Yan Y., Yang C., Dong W., Yan P., Wang P., Yan X., Jia Z. Effect of nano-serpentine and nano-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the frictional properties of PTFE composites in seawater environment // *Industrial Lubrication and Tribology*, 2023, vol. 75, is. 4, pp. 380–386. doi: 10.1108/ILT-11-2022-0342
33. Jia Z., Yan Y., Chen X., Han G. Tribological Behaviors of PTFE Composites Filled with Surface-Modified Nano-Serpentine under Natural Seawater Lubrication // *International Journal of Simulation: Systems, Science and Technology*, 2016, vol. 17, is. 31. doi: 10.5013/IJSSST.a.17.31.36
34. Meng Y., Zhang B., Su J., Han J. Preparation, characterization and properties of montmorillonite modified PTFE/glass fiber composites // *Fibers and Polymers*, 2020, vol. 21, is. 5, pp. 1126–1133. doi: 10.1007/s12221-020-9546-z
35. Zuo Z., Yang Y., Yan P., Song L., Jin X. Organic Montmorillonite/Polyethersulfone/Polytetrafluoroethylene Ternary Nanocomposites: Characterization and Tribological Performance in Dry Sliding Condition // *Fibers and Polymers*, 2022, vol. 23, is. 6, pp. 1475–1489. doi: 10.1007/s12221-022-4558-5
36. Xing D., He G., Hou Z., Ming P., Song S. Preparation and characterization of a modified montmorillonite/sulfonated polyphenylether sulfone/PTFE composite membrane // *International journal of hydrogen energy*, 2011, vol. 36, no. 3, pp. 2177–2183. doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.11.022
37. Сенатов Ф. С., Максимкин А. В., Ергин К. С. Исследование структуры покрытий на основе полифениленсульфида методом сканирующей электронной микроскопии и оптической профилометрии // *Современные проблемы науки и образования*. 2012. № 5. С. 129–129.
38. Yan S., Xue Y., Wang Z., Wang G., Wang S. Retracted: Influence of organic montmorillonite nanoparticles on the microstructures and thermal and tribological properties of polyethersulfone and polytetrafluoroethylene composites // *Polymer International*, 2020, vol. 69, no. 10, pp. 933–953. doi: 10.1002/pi.6035
39. Zuo Z., Yang Y., Song L., Zhang Z., Jin X. Characterization and tribological performance of polyethersulfone/PTFE compound filled with Na-montmorillonite // *Tribology Letters*, 2021, vol. 69. doi: 10.1007/s11249-021-01513-y
40. Кудашев С. В., Терехов А. А., Бабкин В. А., Нистратов А. В., Желтобрюхов В. Ф., Андреев Д. С., Игнатов А. В., Арисова В. Н., Богданов А. И., Кузнецова Н. В. Износ композита на основе полиуретана, полифторированного спирта, монтмориллонита и политетрафторэтилена // *Трение и износ*. 2023. Т. 44, № 2. С. 135–141. doi: 10.32864/0202-4977-2023-44-2-135-141
41. Wang H., Xu L., Zhang M., Li R., Xing Z., Hu J., Wang M., Wu G. More wear-resistant and ductile UHMWPE composite prepared by the addition of radiation cross linked UHMWPE powder // *Journal of Applied Polymer Science*, 2017, vol. 134, is. 13. doi: 10.1002/app.44643
42. Антонов А. С., Ключко П. В., Прокопчук Н. Р., Струк В. А., Вишневикий К. В. Композиционные материалы для функциональных изделий специального назначения // *Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология*. 2024. № 1 (277). С. 87–95. doi: 10.52065/2520-2669-2024-277-12
43. Абакунова Е. В., Данилова С. Н., Слепцова С. А., Охлопкова А. А. Полимерные композиционные материалы на основе ПТФЭ, наполненные модифицированным монтмориллонитом // *Южно-Сибирский научный вестник*. 2021. № 6 (40). С. 113–118. doi: 10.25699/SSSB.2021.40.6.005
44. Мышкин Н. К., Сергиенко В. П., Бухаров С. Н., Мясникова Н. А. Влияние наноразмерных наполнителей на виброакустические характеристики фрикционных композитов // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2017. № 1. С. 30–35.
45. Лазарева Н. Н. Разработка триботехнических материалов на основе политетрафторэтилена и механоактивированных слоистых силикатов : дис. канд. техн. наук : 05.17.06. Якутск, 2019. 173 с.

46. Patent CN104558983A China, B29C43/58, B29C67/04, C08K3/34, C08L27/18, B29C2043/5808. Preparation method of organic-bentonite-modified polytetrafluoroethylene (PTFE) oil seal material / Yang H., Wang H., Wu Ch., Shen Z., Que Y.; Current Assignee Zigong Innovation Center of Zhejiang University. N 201410682388.8A; appl. 24.11.2014; publ. 29.04.2015. 7 p.
47. Cheng H., Huang H. C., Yang M. F., Yang M. H., Yan H., Panzai S., Zheng Z. Y., Zhang Z., Zhang Z. L. Characterization of the remediation of chromium ion contamination with bentonite by terahertz time-domain spectroscopy // *Scientific Reports*, 2022, vol. 12, no. 1. doi: 10.1038/s41598-022-15182-x
48. Xiang D., Gu C. A study on the friction and wear behavior of PTFE filled with ultra-fine kaolin particulates // *Materials Letters*, 2006, vol. 60, is. 5, pp. 689–692. doi: 10.1016/j.matlet.2005.09.061
49. Berladir K., Sviderskiy V. Designing and examining polytetrafluoroethylene composites for tribotechnical purposes with activated ingredients // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, vol. 6, no. 6, pp. 14–21. doi: 10.15587/1729-4061.2016.85095
50. Болдырев В. В. Механохимия и механическая активация твердых веществ // *Успехи химии*. 2006. Т. 75, № 3. С. 203–216.
51. Фундаментальные основы механической активации, механосинтеза и механохимических технологий : монография / отв. ред. Е. Г. Авакумов. Новосибирск : СО РАН, 2009. 342 с.
52. Алешина Л. А., Калинин А. М., Лобов Д. В., Осауленко Р. Н., Фофанов А. Д. Влияние механоактивации на структурное состояние перовскита // *Журнал технической физики*. 2010. Т. 80, № 7. С. 69–71.
53. Xia Y., Yang K., Feng X., Wang Y. Tribological properties of modified kaolin doped polymer as polytetrafluoroethylene grease additive // *Tribology International*, 2022, vol. 173. doi: 10.1016/j.triboint.2022.107612
54. Chen A., Zhao Y., Chen H., Ma H., Lv K. Facile design of PTFE-kaolin-based ternary nanocomposite as a hydrophobic and high corrosion-barrier coating // *Reviews on Advanced Materials Science*, 2024, vol. 63, is. 1. doi: 10.1515/rams-2024-0019
55. Столин А. М., Стельмах Л. С. Влияние температуры на кинетику уплотнения композиционного материала на основе политетрафторэтилена при одностороннем прессовании в цилиндрической прессформе // *Композиты и наноструктуры*. 2024. Т. 16, № 3. С. 165–173. doi: 10.36236/1999-7590-2024-16-3-165-173
56. Столин А. М., Стельмах Л. С. Особенности кинетики уплотнения композиционного материала на основе политетрафторэтилена в режиме постоянной скорости плунжера пресса // *Теоретические основы химической технологии*. 2023. Т. 57, № 3. С. 340–345. doi: 10.31857/S0040357123030193
57. Столин А. М., Стельмах Л. С., Стельмах Э. В. Использование холодного прессования в переработке композиционного материала на основе фторполимера // *Теоретические основы химической технологии*. 2023. Т. 57, № 1. С. 117–124. doi: 10.31857/S0040357123010141
58. Лазарева Н. Н., Слепцова С. А., Охлопкова А. А., Капитонова Ю. В. Исследование влияния механоактивации на свойства и структуру полимерных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена и вермикулита // *Полимерные материалы и технологии*. 2018. Т. 4, № 2. С. 32–40.
59. Енджиевская И. Г., Васильовская Н. Г., Советов В. А., Съомак А. В. Кинетика вспучивания вермикулита Инаглинского месторождения // *Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки*. 2014. Т. 1. С. 115–118.
60. Wang Q., Wang X., Zhang X., Li S., Wang T. Tribological properties study and prediction of PTFE composites based on experiments and machine learning // *Tribology International*, 2023, vol. 188. doi: 10.1016/j.triboint.2023.108815
61. Yan Y., Du J., Ren S., Shao M. Prediction of the Tribological Properties of Polytetrafluoroethylene Composites Based on Experiments and Machine Learning // *Polymers*, 2024, vol. 16, is. 3. doi: 10.3390/polym16030356
62. Damdhar V. S., Pande K. N., Peshwe D. R., Gogte C. L. To investigate the wear mechanism on cryogenic treatment of PTFE-Mica filled composite coatings in cookware // *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2015, vol. 68, pp. 611–621. doi: 10.1007/s12666-014-0491-7
63. Wang X., Tong W., Li Y., Wang Z., Chen Y., Zhang X., Wang X., Zhang Y. Mica-based triboelectric nanogenerators for energy harvesting // *Applied Clay Science*, 2021, vol. 215. doi: 10.1016/j.clay.2021.106330
64. Andreatta F., Lanzutti A., Aneggi E., Gagliardi A., Rondinella A., Simonato M., Fedrizzi L. Degradation of PTFE non-stick coatings for application in the food service industry // *Engineering Failure Analysis*, 2020, vol. 115. doi: 10.1016/j.engfailanal.2020.104652
65. Никитин Л. Н., Галлямов М. О., Саид-Галиев Э. Э., Хохлов А. Р., Бузник В. М. Сверхкритический диоксид углерода как активная среда для химических процессов с участием фторполимеров // *Российский химический журнал*. 2008. Т. 52, № 3. С. 56–65.
66. Shapkin N. P., Leont'ev L. B., Makarov V. N., Khal'chenko I. G., Korochentsev V. V., Shkuratov A. L. Vermiculite-based organosilicate anti-friction composites as coatings on friction surfaces of steel articles // *Russian journal of applied chemistry*, 2014, vol. 87, pp. 1810–1816. doi: 10.1134/S1070427214120039

## References

1. Prorokova N. P., Buznik V. M. Modifikatsirovanie sinteticheskikh voloknistykh materialov s ispol'zovaniem ftoropolimerov (obzor) [Modification of synthetic fiber materials with using fluoro-polymers (review)]. *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer Materials and Technologies], 2017, vol. 3, no. 2, pp. 6–17.
2. Pesetskiy S. S., Bogdanovich S. P., Myshkin N. K. Nanokompozity, poluchaemye dispergirivaniem sloistykh silikatov v rasplavakh polimerov (obzor) [Nanocomposites obtained by dispersion of layered silicates in polymer melts (review)]. *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer Materials and Technologies], 2015, vol. 1, no. 1, pp. 7–37.
3. Alexandre M., Dubois P. Polymer-layered silicate nanocomposites: preparation, properties and uses of a new class of materials. *Materials Science and Engineering*, 2000, vol. 28, pp. 1–63. doi: 10.1016/S0927-796X(00)00012-7
4. Okada A., Fukushima A., Kawasumi M., Inagaki S., Usuki A., Sugiyama S., Kurauchi T., Kamigaito O. Composite material and process for manufacturing same. Patent USA, no. 4739007, 1988. 9 p.
5. Giannelis E. P. Polymer layered silicate nanocomposites. *Advanced materials*, 1996, vol. 8, no. 1, pp. 29–35. doi: 10.1002/adma.19960080104
6. Kudina E. F. Organosilikatnye materialy (obzor) [Organosilicate materials (review)]. *Materialy, tekhnologii, instrumenty* [Materials. Technologies. Tools], 2013, vol. 18, no. 4, pp. 31–42.
7. D'Aquino R. L. A little clay goes a long way. *Chemical Engineering*, 1999, vol. 106, no. 7, pp. 38–40.
8. Gerasin V. A., Zubova T. A., Bakhov F. N., Barannikov A. A., Merekalova N. D., Korolev Yu. M., Antipov E. M. Struktura nanokompozitov polimer/Na+-montmorillonit, poluchennykh smesheniem v rasplave [Structure of polymer/Na+-montmorillonite nanocomposites obtained by mixing in a melt]. *Rossiyskie nanotekhnologii* [Nanotechnologies in Russia], 2007, vol. 2, no. 1-2, pp. 90–105.
9. Messersmith P. B., Giannelis E. P. Synthesis and barrier properties of poly ( $\epsilon$ -caprolactone)-layered silicate nanocomposites. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 1995, vol. 33, is. 7, pp. 1047–1057. doi: 10.1002/pola.1995.080330707
10. Xie W., Gao Z., Liu K., Pan W.P., Vaia R., Hunter D., Singh, A. Thermal characterization of organically modified montmorillonite. *Thermochimica Acta*, 2001, vol. 367-368, pp. 339–350. doi: 10.1016/S0040-6031(00)00690-0

11. Solomon M. J., Almusallam A. S., Seefeldt K. F., Somwangthanaroj A., Varadan P. Rheology of polypropylene/clay hybrid materials. *Macromolecules*, 2001, vol. 34, is. 6, pp. 1864–1872. doi: 10.1021/ma001122e
12. Krishnamoorti R., Giannelis E. P. Rheology of end-tethered polymer layered silicate nanocomposites. *Macromolecules*, 1997, vol. 30, is. 14, pp. 4097–4102. doi: 10.1021/ma960550a
13. Pegoretti A., Kolarik, J., Peroni C., Migliaresi C. Recycled poly (ethylene terephthalate)/layered silicate nanocomposites: morphology and tensile mechanical properties. *Polymer*, 2004, vol. 45, is. 8, pp. 2751–2759. doi: 10.1016/j.polymer.2004.02.015
14. Motamedi P., Bagheri R. Investigation of the nanostructure and mechanical properties of polypropylene/polyamide 6/layered silicate ternary nanocomposites. *Materials & Design*, 2010, vol. 31, is. 4, pp. 1776–1784. doi: 10.1016/j.matdes.2009.11.013
15. Yu K., Shang X., Fu L., Zuo X., Yang H. Clay minerals regulating the performance of tribo-composites: A review. *Green and Smart Mining Engineering*, 2024, vol. 1, is. 2, pp. 220–240. doi: 10.1016/j.gsme.2024.06.002
16. 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, is. 2. doi: 10.3390/molecules24020224
17. 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, is. 21. doi: 10.3390/polym14214658
18. Singh V., Raja P., Katiyar J. K., Ramkumar P. Effect of friction modifiers compositions on tribological properties of Cu-Sn alloy/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> brake composite material. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2021, vol. 235, is. 8, pp. 1541–1550. doi: 10.1177/1350650120974132
19. Saha D., Satapathy B. K. Influence of various types of clays on velocity dependence of friction composites. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2021, vol. 235, is. 11, pp. 2415–2431. doi: 10.1177/13506501211002312
20. Abdel-Latif M. M., El-Tayeb N. S., Mahale V., Bijwe J. The effect of wollastonite silane-treatment on mechanical and tribological performance of NAO brake-pads. *International Journal of Surface Science and Engineering*, 2019, vol. 13, no. 4, pp. 293–316. doi: 10.1504/IJSURFSE.2019.103936
21. Goettler L. A., Lee K. Y., Thakkar H. Layered silicate reinforced polymer nanocomposites: development and applications. *Polymer Reviews*, 2007, vol. 47, no. 2, pp. 291–317. doi: 10.1080/15583720701271328
22. *Layered mineral structures and their application in advanced technologies* / eds.: M. F. Brigatti, A. Mottana. London : EMU Notes in Mineralogy, 2011. 376 p. doi: 10.1180/EMU-notes.11
23. Wenk H. R., Bulakh A. *Minerals: their constitution and origin*. Cambridge ; New York : Cambridge University Press, 2004. xxii, 646 p.
24. Liebau F. Classification of silicates. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 1980, vol. 5, no. 1, pp. 1–24.
25. Maiti P., Yamada K., Okamoto M., Ueda K., Okamoto K. New poly(lactide)/layered silicate nanocomposites: role of organoclays. *Chemistry of materials*, 2002, vol. 14, is. 11, pp. 4654–4661. doi: 10.1021/cm020391b
26. Pesetskiy S. S., Bogdanovich S. P., Myshkin N. K. Nanokompozity, poluchaemye dispergirovaniem nanochastits v rasplavakh polimerov: poluchenie, svoystva, primenenie [Nanocomposites obtained by dispersing nanoparticles in polymer melts: production, properties, application]. *Sbornik plenarnykh dokladov IV Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Nanostrukturnye materialy: Belarus' - Rossiya - Ukraina. Nano-2014»* [Collection of plenary reports of the IV International scientific conference “Nanostructured Materials: Belarus - Russia - Ukraine. Nano-2014”]. Minsk : Belaruskaya navuka Publ., 2015, pp. 241–254.
27. Pesetskiy S. S., Bogdanovich S. P., Myshkin N. K. Tribotekhnicheskie svoystva nanokompozitov, poluchaemykh dispergirovaniem napolniteley v rasplavakh polimerov [Tribological behavior of nanocomposites obtained by dispersion of fillers in polymer melts]. *Trenie i iznos* [Friction and Wear], 2007, vol. 28, no. 5, pp. 500–524.
28. Ke Y. C., Stroeve P. *Polymer-layered silicate and silica nanocomposites* Netherlands : Elsevier, 2005. 398 p.
29. Jia Z., Yang Y. Self-lubricating properties of PTFE/serpentine nanocomposite against steel at different loads and sliding velocities. *Composites Part B: Engineering*, 2012, vol. 43, is. 4, pp. 2072–2078. doi: 10.1016/j.compositesb.2012.01.014
30. Jia Z. N., Yang Y. L., Chen J. J., Yu X. J. Influence of serpentine content on tribological behaviors of PTFE/serpentine composite under dry sliding condition. *Wear*, 2010, vol. 268, is. 7–8, pp. 996–1001. doi: 10.1016/j.wear.2009.12.009
31. Jia Z. N., Hao C. Z., Yang Y. L. Tribological performance of hybrid PTFE/serpentine composites reinforced with nanoparticles. *Tribology-Materials, Surfaces & Interfaces*, 2014, vol. 8, is. 3, pp. 139–145. doi: 10.1179/1751584X13Y.0000000058
32. Yan Y., Yang C., Dong W., Yan P., Wang P., Yan X., Jia Z. Effect of nano-serpentine and nano-La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the frictional properties of PTFE composites in seawater environment. *Industrial Lubrication and Tribology*, 2023, vol. 75, is. 4, pp. 380–386. doi: 10.1108/ILT-11-2022-0342
33. Jia Z., Yan Y., Chen X., Han G. Tribological Behaviors of PTFE Composites Filled with Surface-Modified Nano-Serpentine under Natural Seawater Lubrication. *International Journal of Simulation: Systems, Science and Technology*, 2016, vol. 17, is. 31. doi: 10.5013/IJSSST.a.17.31.36
34. Meng Y., Zhang B., Su J., Han J. Preparation, characterization and properties of montmorillonite modified PTFE/glass fiber composites. *Fibers and Polymers*, 2020, vol. 21, is. 5, pp. 1126–1133. doi: 10.1007/s12221-020-9546-z
35. Zuo Z., Yang Y., Yan P., Song L., Jin X. Organic Montmorillonite/Polyethersulfone/Polytetrafluoroethylene Ternary Nanocomposites: Characterization and Tribological Performance in Dry Sliding Condition. *Fibers and Polymers*, 2022, vol. 23, is. 6, pp. 1475–1489. doi: 10.1007/s12221-022-4558-5
36. Xing D., He G., Hou Z., Ming P., Song S. Preparation and characterization of a modified montmorillonite/sulfonated polyphenylether sulfone/PTFE composite membrane. *International journal of hydrogen energy*, 2011, vol. 36, no. 3, pp. 2177–2183. doi: 10.1016/j.ijhydene.2010.11.022
37. Senatov F. S., Maksimkin A. V., Ergin K. S. Issledovanie struktury pokrytiy na osnove polifenilensulfida metodom skaniruyushchey elektronnoy mikroskopii i opticheskoy profilometrii [Study of the structure of coatings based on polyphenylene sulfide by scanning electron microscopy and optical profilometry]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education], 2012, no. 5, pp. 129–129.
38. Yan S., Xue Y., Wang Z., Wang G., Wang S. Retracted: Influence of organic montmorillonite nanoparticles on the microstructures and thermal and tribological properties of polyethersulfone and polytetrafluoroethylene composites. *Polymer International*, 2020, vol. 69, no. 10, pp. 933–953. doi: 10.1002/pi.6035
39. Zuo Z., Yang Y., Song L., Zhang Z., Jin X. Characterization and tribological performance of polyethersulfone/PTFE compound filled with Na-montmorillonite. *Tribology Letters*, 2021, vol. 69. doi: 10.1007/s11249-021-01513-y
40. Kudashev S. V., Terekhov A. A., Babkin V. A., Nistratov A. V., Zheltobryukhov V. F., Andreev D. S., Ignatov A. V., Arisova V. N., Bogdanov A. I., Kuznetsova N. V. Iznos kompozita na osnove poliuretana, poliflorirovannogo spirta, montmorillonita i politetraforetilena [Wear of a composite based on polyurethane, polyfluorinated alcohol, montmorillonite and polytetrafluoroethylene]. *Trenie i iznos* [Wear of a composite based on polyurethane, polyfluorinated alcohol, montmorillonite and polytetrafluoroethylene], 2023, vol. 44, no. 2, pp. 135–141. doi: 10.32864/0202-4977-2023-44-2-135-141
41. Wang H., Xu L., Zhang M., Li R., Xing Z., Hu J., Wang M., Wu G. More wear-resistant and ductile UHMWPE composite prepared by the

- addition of radiation cross linked UHMWPE powder. *Journal of Applied Polymer Science*, 2017, vol. 134, is. 13. doi: 10.1002/app.44643
42. Antonov A. S., Klochko P. V., Prokopchuk N. R., Struk V. A., Vishnevskiy K. V. Kompozitsionnye materialy dlya funktsional'nykh izdeliy spetsial'nogo naznacheniya [Composite materials for functional special-purpose products]. *Trudy BGTU. Seriya 2: Khimicheskaya tekhnologiya, biotekhnologiya, geoekologiya* [Proceedings of BSTU. 2: Chemical technologies. Biotechnology. Geoecology], 2024, no. 1 (277), pp. 87–95. doi: 10.52065/2520-2669-2024-277-12
  43. Abakunova E. V., Danilova S. N., Sleptsova S. A., Okhlopko A. A. Polimernye kompozitsionnye materialy na osnove PTFE, napolnennye modifitsirovannym montmorillonitom [Polymer composite materials based on polytetrafluoroethylene filled with modified montmorillonite]. *Yuzhno-Sibirskiy nauchnyy vestnik* [South-Siberian Scientific Bulletin], 2021, no. 6 (40), pp. 113–118. doi: 10.25699/SSSB.2021.40.6.005
  44. Myshkin N. K., Sergienko V. P., Bukharov S. N., Myasnikova N. A. Vliyaniye nanorazmernykh napolniteley na vibroakusticheskie kharakteristiki friktsionnykh kompozitov [Influence of nanosized fillers on vibroacoustic characteristics of friction composites]. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Rostov State University of Railway Engineering], 2017, no. 1, pp. 30–35.
  45. Lazareva N. N. Razrabotka tribotekhnicheskikh materialov na osnove politetraftoretilena i mekhanoaktivirovannykh sloistykh silikatov. Diss. kand. tekhn. nauk [Development of tribological materials based on polytetrafluoroethylene and mechanically activated layered silicates. PhD eng. sci. diss.]. Yakutsk, 2019. 173 p.
  46. Yang H., Wang H., Wu Ch., Shen Z., Que Y. Preparation method of organic-bentonite-modified polytetrafluoroethylene (PTFE) oil seal material. Patent China, no. CN104558983A, 2015. 7 p.
  47. Cheng H., Huang H. C., Yang M. F., Yang M. H., Yan H., Panzai S., Zheng Z. Y., Zhang Z., Zhang Z. L. Characterization of the remediation of chromium ion contamination with bentonite by terahertz time-domain spectroscopy. *Scientific Reports*, 2022, vol. 12, no. 1. doi: 10.1038/s41598-022-15182-x
  48. Xiang D., Gu C. A study on the friction and wear behavior of PTFE filled with ultra-fine kaolin particulates. *Materials Letters*, 2006, vol. 60, is. 5, pp. 689–692. doi: 10.1016/j.matlet.2005.09.061
  49. Berladir K., Sviderskiy V. Designing and examining polytetrafluoroethylene composites for tribotechnical purposes with activated ingredients. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, vol. 6, no. 6, pp. 14–21. doi: 10.15587/1729-4061.2016.85095
  50. Boldyrev V. V. Mekhanokhimiya i mekhanicheskaya aktivatsiya tverdykh veshchestv [Mechanochemistry and mechanical activation of solids]. *Uspekhi khimii* [Russian Chemical Reviews], 2006, vol. 75, no. 3, pp. 203–216.
  51. *Fundamental'nye osnovy mekhanicheskoy aktivatsii, mekhanosinteza i mekhanokhimicheskikh tekhnologiy: monografiya* [Fundamental principles of mechanical activation, mechanochemistry and mechanochemical technologies: monograph]. Ed. E. G. Avvakumov. Novosibirsk: SO RAN Publ., 2009. 342 p.
  52. Aleshina L. A., Kalinkin A. M., Lobov D. V., Osaulenko R. N., Fofanov A. D. Vliyaniye mekhanoaktivatsii na strukturnoe sostoyaniye perovskite [Effect of mechanical activation on the structural state of perovskite]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Journal of Applied Physic], 2010, vol. 80, no. 7, pp. 69–71.
  53. Xia Y., Yang K., Feng X., Wang Y. Tribological properties of modified kaolin doped polymer as polytetrafluoroethylene grease additive. *Tribology International*, 2022, vol. 173. doi: 10.1016/j.triboint.2022.107612
  54. Chen A., Zhao Y., Chen H., Ma H., Lv K. Facile design of PTFE-kaolin-based ternary nanocomposite as a hydrophobic and high corrosion-barrier coating. *Reviews on Advanced Materials Science*, 2024, vol. 63, is. 1. doi: 10.1515/rams-2024-0019
  55. Stolin A. M., Stel'makh L. S. Vliyaniye temperatury na kinetiku uplotneniya kompozitsionnogo materiala na osnove politetraftoretilena pri odnostoronnem pressovanii v tsilindricheskoy pressforme [Influence of temperature on compaction kinetics of polytetrafluoroethylene-based composite material during one-sided pressing in cylindrical mold]. *Kompozity i nanostruktury* [Composites and nanostructures], 2024, vol. 16, no. 3, pp. 165–173. doi: 10.36236/1999-7590-2024-16-3-165-173
  56. Stolin A. M., Stel'makh L. S. Osobennosti kinetiki uplotneniya kompozitsionnogo materiala na osnove politetraftoretilena v rezhime postoyannoy skorosti plunzhera pressa [Features of the compaction kinetics of a composite material based on polytetrafluoroethylene in the constant plunger speed mode of a press]. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical Foundations of Chemical Engineering], 2023, vol. 57, no. 3, pp. 340–345. doi: 10.31857/S0040357123030193
  57. Stolin A. M., Stel'makh L. S., Stel'makh E. V. Ispol'zovanie kholodnogo pressovaniya v pererabotke kompozitsionnogo materiala na osnove ftorpolimera [Use of cold pressing in processing of composite material based on fluoropolymer]. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii* [Theoretical Foundations of Chemical Engineering], 2023, vol. 57, no. 1, pp. 117–124. doi: 10.31857/S0040357123010141
  58. Lazareva N. N., Sleptsova S. A., Okhlopko A. A., Kapitonova Yu. V. Issledovanie vliyaniya mekhanoaktivatsii na svoystva i strukturu polimernykh kompozitsionnykh materialov na osnove politetraftoretilena i vermikulita [The effect of mechanical activation on the properties and structure of polymer composite materials based on polytetrafluoroethylene and vermiculite]. *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer Materials and Technologies], 2018, vol. 4, no. 2, pp. 32–40.
  59. Endzhiyevskaya I. G., Vasilovskaya N. G., Sovetov V. A., S'omak A. V. Kinetika vspuchivaniya vermikulita Inaglinskogo mestorozhdeniya [Kinetics of swelling of vermiculite from the Inaglinskoye deposit]. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennyye i inzhenernyye nauki* [Proceedings of Bratsk State University. Series: Natural and Engineering Sciences], 2014, vol. 1, pp. 115–118.
  60. Wang Q., Wang X., Zhang X., Li S., Wang T. Tribological properties study and prediction of PTFE composites based on experiments and machine learning. *Tribology International*, 2023, vol. 188. doi: 10.1016/j.triboint.2023.108815
  61. Yan Y., Du J., Ren S., Shao M. Prediction of the Tribological Properties of Polytetrafluoroethylene Composites Based on Experiments and Machine Learning. *Polymers*, 2024, vol. 16, is. 3. doi: 10.3390/polym16030356
  62. Damdhar V. S., Pande K. N., Peshwe D. R., Gogte C. L. To investigate the wear mechanism on cryogenic treatment of PTFE-Mica filled composite coatings in cookware. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 2015, vol. 68, pp. 611–621. doi: 10.1007/s12666-014-0491-7
  63. Wang X., Tong W., Li Y., Wang Z., Chen Y., Zhang X., Wang X., Zhang Y. Mica-based triboelectric nanogenerators for energy harvesting. *Applied Clay Science*, 2021, vol. 215. doi: 10.1016/j.clay.2021.106330
  64. Andreatta F., Lanzutti A., Aneggi E., Gagliardi A., Rondinella A., Simonato M., Fedrizzi L. Degradation of PTFE non-stick coatings for application in the food service industry. *Engineering Failure Analysis*, 2020, vol. 115. doi: 10.1016/j.engfailanal.2020.104652
  65. Nikitin L. N., Gallyamov M. O., Said-Galiev E. E., Khokhlov A. R., Buznik V. M. Sverkhkriticheskiy dioksid ugleroda kak aktivnaya sreda dlya khimicheskikh protsessov s uchastiem ftorpolimerov [Supercritical carbon dioxide as an active medium for chemical processes involving fluoropolymers]. *Rossiyskiy khimicheskii zhurnal* [Russian Journal of General Chemistry], 2008, vol. 52, no. 3, pp. 56–65.
  66. Shapkin N. P., Leont'ev L. B., Makarov V. N., Khal'chenko I. G., Korochentsev V. V., Shkuratov A. L. Vermiculite-based organosilicate antifriction composites as coatings on friction surfaces of steel articles. *Russian journal of applied chemistry*, 2014, vol. 87, pp. 1810–1816. doi: 10.1134/S1070427214120039

