

<http://doi.org/10.32864/polymmattech-2021-7-4-39-49>

УДК 678.743.41:661.666.4:661.846'065

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТАЛЬКА И ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА

Т. С. СТРУЧКОВА, А. П. ВАСИЛЬЕВ⁺, А. А. ОХЛОПКОВА, Е. И. ПАВЛОВА, А. Г. АЛЕКСЕЕВ

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

Цель работы — исследование влияния комплексного механоактивированного наполнителя, содержащего тальк (Т) и технический углерод (ТУ), на структуру и свойства политетрафторэтилена (ПТФЭ). Полимерные композиционные материалы получали поэтапно: 1 – смешивали наполнители с ПТФЭ; 2 – формовали смесь; 3 – спекали формованные изделия. Перед смешением компонентов проводили механоактивацию наполнителей в планетарной мельнице. Методами рентгеноструктурного анализа и сканирующей электронной микроскопии изучили влияние содержания наполнителей на структурные особенности композиционных материалов. Установлено, что введение комплексного механоактивированного наполнителя приводит к увеличению степени кристалличности при 5 мас.% талька, а также к изменению надмолекулярной структуры ПТФЭ из ленточной в сферолитоподобную.

Исследовано влияние ТУ + Т на деформационно-прочностные свойства полученных композиционных материалов в зависимости от их содержания. Экспериментальные результаты показали, что прочность при растяжении и эластичность полимерных композитов, содержащего 0,5 мас.% ТУ и 0,5–2 мас.% талька, увеличиваются на 40% и 56% по сравнению с ненаполненным полимером. Проведено исследование триботехнических характеристик полученных материалов. Так, износостойкость полимерных композитов увеличивается в 270–375 раз при сохранении низкого коэффициента трения. Методами СЭМ и ИК-спектроскопии показано образование защитных вторичных структур на поверхности трения, которые защищают поверхностный слой материала от разрушения. Разработанные материалы могут найти применение в узлах трения машин и техники, работающих без смазки, с ограниченной смазкой и в коррозионной среде.

Ключевые слова: политетрафторэтилен, тальк, технический углерод, механоактивация, физико-механические свойства, триботехнические характеристики, морфология поверхностей трения.

STUDY OF THE EFFECT OF TALC AND INDUSTRIAL CARBON BLACK ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF POLYTETRAFLUOROETHYLENE

T. S. STRUCHKOVA, A. P. VASILEV⁺, A. A. OKHLOPKOVA, E. I. PAVLOVA, A. G. ALEKSEEV

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

The work aim is to study the effect of a complex mechanically activated filler containing talc and industrial carbon black (CB) on the structure and properties of polytetrafluoroethylene (PTFE).

Polymer composites were prepared stepwise: 1 – fillers were mixed with PTFE; 2 – the mixture was molded; 3 – molded products were sintered. Before mixing the components, the fillers were mechanoactivated in a planetary mill. Methods of X-ray analysis and scanning electron microscopy

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

were used to study the effect of the filler content on the structural features of the composite materials. It was found that the introduction of a complex mechanically activated filler leads to an increase in the degree of crystallinity at 5 wt% talc and a change in the supramolecular structure of PTFE from ribbon to spherulite-like.

The effect of the complex filler on the deformation-strength properties of the obtained composite materials depending on their content was investigated. Experimental results showed that the tensile strength and elasticity of polymer composites containing 0.5 wt.% CB and 0.5–2 wt.% talc increased by 40% and 56% compared to the unfilled polymer. The investigation of tribotechnical characteristics of the obtained materials was carried out. So, the wear resistance of polymeric composites increases 270–375 times at the preservation of a low friction coefficient. It is shown formation of secondary protective structures on the friction surface protecting a surface layer of material from destruction with SEM and IR spectroscopy methods. The developed materials can be applied in friction units of the machines and technics working without greases, with the limited grease, and in the corrosive environment.

Keywords: polytetrafluoroethylene, talc, carbon black, mechanical activation, physical and mechanical properties, tribotechnical characteristics, morphology of friction surfaces.

Поступила в редакцию 01.10.2021

© Т. С. Стручкова, А. П. Васильев, А. А. Охлопкова, Е. И. Павлова, А. Г. Алексеев, 2021

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:

Стручкова Т. С., Васильев А. П., Охлопкова А. А., Павлова Е. И., Алексеев А. Г. Исследование влияния талька и технического углерода на структуру и свойства политетрафторэтилена // Полимерные материалы и технологии. 2021. Т. 7, № 4. С. 39–49. <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2021-7-4-39-49>

Citation sample:

Struchkova T. S., Vasil'ev A. P., Okhlopkova A. A., Pavlova E. I., Alekseev A. G. Issledovanie vliyaniya tal'ka i tekhnicheskogo ugleroda na strukturu i svoystva politetraftoretilena [Study of the effect of talc and industrial carbon black on the structure and properties of polytetrafluoroethylene]. *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer Materials and Technologies], 2021, vol. 7, no. 4, pp. 39–49. <http://doi.org/10.32864/polymmattech-2021-7-4-39-49>

Литература

1. Virpe K., Deshpande A., Kulkarni A. A review on tribological behavior of polymer composite impregnated with carbon fillers // AIP Conference Proceedings, 2020, vol. 2311, no. 1. doi: 10.1063/5.0035408
2. Dhanumalayan E., Joshi G. M. Performance properties and applications of polytetrafluoroethylene (PTFE) — a review // Advanced Composites and Hybrid Materials, 2018, vol. 1, no. 2, pp. 247–268. doi: 10.1007/s42114-018-0023-8
3. Deaconescu A., Deaconescu T. Tribological Behavior of Hydraulic Cylinder Coaxial Sealing Systems Made from PTFE and PTFE Compounds // Polymers, 2020, vol. 12, no. 1. doi: 10.3390/polym12010155
4. Охлопкова А. А., Виноградов А. В., Пинчук Л. С. Пластики, наполненные ультрадисперсными неорганическими соединениями. Гомель: ИММС НАНБ. 1999. 164 с.
5. Khedkar J., Negulescu I., Meletis E. I. Sliding wear behavior of PTFE composites // Wear, 2002, vol. 252, no. 5–6, pp. 361–369. doi: 10.1016/S0043-1648(01)00859-6
6. Краснов А. П., Адериха В. Н., Афоничева О. В., Мить В. А., Тихонов Н. Н., Васильков А. Ю., Саид-Галиев Э. Е., Наумкин А. В., Николаев А. Ю. О систематизации нанонаполнителей полимерных композитов // Трение и износ. 2010. Т. 31. № 1. С. 93–108.
7. Rallini M., Kenny J. M. Nanofillers in polymers // Modification of polymer properties / eds.: C. F. Jasso-Gastinel, J. M. Kenny. Amsterdam

- [et al.] : William Andrew Publ., 2017, pp. 47–86. doi: 10.1016/B978-0-323-44353-1.00003-8
8. Wu S., Peng S., Wang C. H. Multifunctional polymer nanocomposites reinforced by aligned carbon nanomaterials // *Polymers*, 2018, vol. 10, no. 5. doi: 10.3390/polym10050542
 9. Ray S. S., Okamoto M. Polymer/layered silicate nanocomposites: a review from preparation to processing // *Progress in polymer science*, 2003, vol. 28, is. 11, pp. 1539–1641. doi: 10.1016/j.progpolymsci.2003.08.002
 10. Авдейчик С. В., Струк В. А., Антонов А. С., Гольдаде В. А. Роль энергетического фактора в технологии полимерных композитов // *Полимерные материалы и технологии*. 2021. Т. 7, № 1. С. 60–70. doi: 10.32864/polymmattech-2021-7-1-60-70.
 11. Sleptsova S. A., Okhlopko A. A., Kapitonova I. V., Lazareva N. N., Makarov M. M., Nikiforov L. A. Spectroscopic study of tribooxidation processes in modified PTFE // *Journal of Friction and Wear*, 2016, vol. 37, no. 2, pp. 129–135. doi: 10.3103/S106836661602015X
 12. Sleptsova S. A., Lazareva N. N., Fedoseeva V. I., Kapitonova Y. V., Okhlopko 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
 13. 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.
 14. 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.
 15. Lapcik L., Jr., Jindrova P., Lapcikova B., Tamyln R., Greenwood R., Rowson N. Effect of the talc filler content on the mechanical properties of polypropylene composites // *Journal of Applied Polymer Science*, 2008, vol. 110, no. 5, pp. 2742–2747. doi: 10.1002/app.28797
 16. Антанович Н. А., Ищенко М. В. Структура и свойства малонаполненных триботехнических композитов на основе политетрафторэтилена // *Известия НАН Беларуси. Серия физико-технических наук*. 2010. № 3. С. 22–28.
 17. Tóth L. F., De Baets P., Szébenyi G. Thermal, Viscoelastic, Mechanical and Wear Behaviour of Nanoparticle Filled Polytetrafluoroethylene: A Comparison // *Polymers*, 2020, vol. 12, no. 9. doi: 10.3390/polym12091940
 18. Ляхов Н. З., Алхимов А. П., Бузник В. М., Фомин В. М., Игнатьева Л. И., Цветников А. К., Кудрявый В. Г., Косарев В. Ф., Губин С. П., Ломовский О. И., Охлопкова А. А., Уваров Н. Ф., Клинок С. В., Шабалин И. И. Металлополимерные нанокompозиты (получение, свойства, применение). Новосибирск : СО РАН, 2005. 259 с.
 19. Jiang B., Zhu A., Zhang C., Li Y. Interface enhancement between polytetrafluoroethylene and glass fibers modified with a titanate coupler // *Journal of Applied Polymer Science*, 2017, vol. 134, is. 14. doi: 10.1002/app.44668
 20. Aderikha V. N., Shapovalov V. A. Effect of filler surface properties on structure, mechanical and tribological behavior of PTFE-carbon black composites // *Wear*, 2010, vol. 268, no. 11–12, pp. 1455–1464. doi: 10.1016/j.wear.2010.02.022
 21. Адери́ха В. Н., Шаповалов В. А., Плескачевский Ю. М. Прочностные свойства, структура и износостойкость композитов ПТФЭ–технический углерод // *Трение и износ*. 2008. Т. 29. № 2. С. 160–168.
 22. Takeichi Y., Wibowo A., Kawamura M., Uemura M. Effect of morphology of carbon black fillers on the tribological properties of fibrillated PTFE // *Wear*, 2008, vol. 264, no. 3–4, pp. 308–315. doi: 10.1016/j.wear.2007.03.013
 23. Conte M., Igarua A. Study of PTFE composites tribological behavior // *Wear*, 2012, vol. 296, no. 1–2, pp. 568–574. doi: 10.1016/j.wear.2012.08.015
 24. Bhargava S., Makowiec M. E., Blanchet T. A. Wear reduction mechanisms within highly wear-resistant graphene-and other carbon-filled PTFE nanocomposites // *Wear*, 2020, vol. 444–445. doi: 10.1016/j.wear.2019.203163
 25. Мартынов М. А., Выегжанина К. А. Рентгенография полимеров. Л. : Химия, 1972. 94 с.
 26. Fu T., Mo Z., Han P., Qi Y., Wu S., Chen D. Study on factors affecting room temperature transition of polytetrafluoroethylene // *Chin. J. Polym. Sci.*, 1986, vol. 4, no. 2, pp. 170–179.
 27. Калистратова Л. Ф., Волкова В. К. Упорядочение аморфной фазы полимерной матрицы: структурные и рентгенографические характеристики наполненного ПТФЭ // *Полимерные материалы и технологии*. 2021. Т. 7, № 1. С. 41–49. doi: 10.32864/polymmattech-2021-7-1-41-49
 28. Васильев А. П., Охлопкова А. А., Стручкова Т. С., Алексеев А. Г. Влияние модифицированного серицита на свойства и структуру политетрафторэтилена // *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2020. Т. 25, № 2. С. 147–156. doi: 10.31242/2618-9712-2020-25-2-12
 29. Машков Ю. К., Малий О. В. Трибофизика конструкционных материалов: учеб. пособие. Омск : ОмГТУ, 2017. 176 с.
 30. Sleptsova S. A., Okhlopko A. A., Kapitonova I. V., Lazareva N. N., Vasiliev A. P., Nikiforov L. A., Tarasova P. N., Laukkanen S. Effects of Surface Reactions during Friction on Tribological Characteristics of PTFE-Muscovite Composites // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1060, no. 1. doi: 10.1088/1757-899X/1060/1/012020
 31. Игнатьева Л. Н., Бузник В. М. ИК-спектроскопические исследования политетрафторэтилена и его модифицированных форм // *Российский химический журнал*. 2008. Т. LII, № 3. С. 139–146.
 32. Sun W., Liu X., Liu K., Xu J., Lu Y., Ye J. Mechanochemical Functionality of Graphene Additives in Ultralow Wear Polytetrafluoroethylene Composites // *Carbon*, 2021, vol. 184, pp. 312–321. doi: 10.1016/j.carbon.2021.08.042

References

1. Virpe K., Deshpande A., Kulkarni A. A review on tribological behavior of polymer composite impregnated with carbon fillers. *AIP Conference Proceedings*, 2020, vol. 2311, no. 1. doi: 10.1063/5.0035408
2. Dhanumalayan E., Joshi G. M. Performance properties and applications of polytetrafluoroethylene (PTFE) — a review. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2018, vol. 1, no. 2, pp. 247–268. doi: 10.1007/s42114-018-0023-8
3. Deaconescu A., Deaconescu T. Tribological Behavior of Hydraulic Cylinder Coaxial Sealing Systems Made from PTFE and PTFE Compounds. *Polymers*, 2020, vol. 12, no. 1. doi: 10.3390/polym12010155
4. Okhlopko A. A., Vinogradov A. V., Pinchuk L. S. *Plastiki, napolnennyye ul'tradispersnyimi neorganicheskimi soedineniyami* [Plastics filled with ultrafine inorganic compounds]. GomeI' : IMMS NANB Publ., 1999. 164 p.
5. Khedkar J., Negulescu I., Meletis E. I. Sliding wear behavior of PTFE composites. *Wear*, 2002, vol. 252, no. 5–6, pp. 361–369. doi: 10.1016/S0043-1648(01)00859-6
6. Krasnov A. P., Aderikha V. N., Afonicheva O. V., Mit' V. A., Tikhonov N. N., Vasil'kov A. Yu., Said-Galiev E. E., Naumkin A. V., Nikolaev A. Yu. O sistematzatsii nanopolniteley polimernykh kompozitov [On the systematization of nanofillers of polymer composites]. *Trenie i iznos* [Friction and Wear], 2010, vol. 31, no. 1, pp. 93–108.
7. Rallini M., Kenny J. M. Nanofillers in polymers. *Modification of polymer properties*. Eds.: C. F. Jasso-Gastinel, J. M. Kenny. Amsterdam [et al.] : William Andrew Publ., 2017, pp. 47–86. doi: 10.1016/B978-0-323-44353-1.00003-8
8. Wu S., Peng S., Wang C. H. Multifunctional polymer nanocomposites reinforced by aligned carbon nanomaterials. *Polymers*, 2018, vol. 10, no. 5. doi: 10.3390/polym10050542

9. Ray S. S., Okamoto M. Polymer/layered silicate nanocomposites: a review from preparation to processing. *Progress in polymer science*, 2003, vol. 28, no. 11, pp. 1539–1641. doi: 10.1016/j.progpolymsci.2003.08.002
10. Avdeychik S. V., Struk V. A., Antonov A. S., Gol'dade V. A. Rol' energeticheskogo faktora v tekhnologii polimernykh kompozitov [Energy factor in technology of polymeric composites]. *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer Materials and Technologies], 2021, vol. 7, no. 1, pp. 60–70. doi: 10.32864/polymmattech-2021-7-1-60-70.
11. Sleptsova S. A., Okhlopkova A. A., Kapitonova I. V., Lazareva N. N., Makarov M. M., Nikiforov L. A. Spectroscopic study of tribooxidation processes in modified PTFE. *Journal of Friction and Wear*, 2016, vol. 37, no. 2, pp. 129–135. doi: 10.3103/S106836661602015X
12. 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
13. Lazareva N. N., Sleptsova S. A., Kapitonova Yu. V., Okhlopkova A. A., Moskvitina L. V. Razrabotka polimernykh kompozitov na osnove politetraftoretilena 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.
14. Lazareva N. N., Sleptsova S. A., Okhlopkova 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.
15. Lapcik L., Jr., Jindrova P., Lapcikova B., Tamblyn R., Greenwood R., Rowson N. Effect of the talc filler content on the mechanical properties of polypropylene composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 2008, vol. 110, no. 5, pp. 2742–2747. doi: 10.1002/app.28797
16. Antanovich N. A., Ishchenko M. V. Struktura i svoystva malonapolnennykh tribotekhnicheskikh kompozitov na osnove politetraftoretilena [Structure and properties of low-filled tribotechnical composites based on polytetrafluoroethylene]. *Izvestiya NAN Belarusi. Seriya fiziko-tekhnicheskikh nauk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physics and Technology Series], 2010, no. 3, pp. 22–28.
17. Tóth L. F., De Baets P., Szebényi G. Thermal, Viscoelastic, Mechanical and Wear Behaviour of Nanoparticle Filled Polytetrafluoroethylene: A Comparison. *Polymers*, 2020, vol. 12, no. 9. doi: 10.3390/polym12091940
18. Lyakhov N. Z., Alkhimov A. P., Buznik V. M., Fomin V. M., Ignat'eva L. I., Tsvetnikov A. K., Kudryavyy V. G., Kosarev V. F., Gubin S. P., Lomovskiy O. I., Okhlopkova A. A., Uvarov N. F., Klinkov S. V., Shabalin I. I. *Metallopolimernye nanokompozity (poluchenie, svoystva, primeneniye)* [Metal-polymer nanocomposites (preparation, properties, application)]. Novosibirsk : SO RAN Publ., 2005, 259 p.
19. Jiang B., Zhu A., Zhang C., Li Y. Interface enhancement between polytetrafluoroethylene and glass fibers modified with a titanate coupler. *Journal of Applied Polymer Science*, 2017, vol. 134, is. 14. doi: 10.1002/app.44668
20. Aderikha V. N., Shapovalov V. A. Effect of filler surface properties on structure, mechanical and tribological behavior of PTFE-carbon black composites. *Wear*, 2010, vol. 268, no. 11–12, pp. 1455–1464. doi: 10.1016/j.wear.2010.02.022
21. Aderikha V. N., Shapovalov V. A., Pleskachevskiy Yu. M. Prochnostnye svoystva, struktura i iznosostoykost' kompozitov PTFE–tekhnicheskiiy uglomerod [Strength properties, structure and wear resistance of PTFE-carbon black composites]. *Trenie i iznos* [Friction and Wear], 2008, vol. 29, no. 2. pp. 160–168.
22. Takeichi Y., Wibowo A., Kawamura M., Uemura M. Effect of morphology of carbon black fillers on the tribological properties of fibrillated PTFE. *Wear*, 2008, vol. 264, no. 3–4, pp. 308–315. doi: 10.1016/j.wear.2007.03.013
23. Conte M., Igartua A. Study of PTFE composites tribological behavior. *Wear*, 2012, vol. 296, no. 1–2, pp. 568–574. doi: 10.1016/j.wear.2012.08.015
24. Bhargava S., Makowiec M. E., Blanchet T. A. Wear reduction mechanisms within highly wear-resistant graphene-and other carbon-filled PTFE nanocomposites. *Wear*, 2020, vol. 444–445. doi: 10.1016/j.wear.2019.203163
25. Martynov M. A., Vylegzhanina K. A. *Rentgenografiya polimerov* [X-ray of polymers]. Leningrad : Khimiya Publ., 1972. 94 p.
26. Fu T., Mo Z., Han P., Qi Y., Wu S., Chen D. Study on factors affecting room temperature transition of polytetrafluoroethylene. *Chin. J. Polym. Sci.*, 1986, vol. 4, no. 2, pp. 170–179.
27. Kalistratova L. F., Volkova V. K. Uporyadochenie amorfnoy fazy polimernoy matritsy: strukturnye i rentgenograficheskie kharakteristiki napolnennogo PTFE [Ordering of the amorphous phase of a polymer matrix: structural and x-ray characteristics of filled PTFE]. *Polimernye materialy i tekhnologii* [Polymer Materials and Technologies], 2021, vol. 7, no. 1, pp. 41–49. doi: 10.32864/polymmattech-2021-7-1-41-49.
28. Vasil'ev A. P., Okhlopkova A. A., Struchkova T. S., Alekseev A. G. Vliyanie modifitsirovannogo seritsita na svoystva i strukturu politetraftoretilena [Influence of modified sericite on the properties and structure of polytetrafluoroethylene]. *Prirodnye resursy Arktiki i Subarktki* [Natural resources of the Arctic and Subarctic], 2020, vol. 25, no. 2, pp. 147–156. doi: 10.31242/2618-9712-2020-25-2-12
29. Mashkov Yu. K., Maliy O. V. *Tribofizika konstruktsionnykh materialov* [Tribophysics of structural materials]. Omsk : OmGTU Publ., 2017. 176 p.
30. Sleptsova S. A., Okhlopkova A. A., Kapitonova I. V., Lazareva N. N., Vasiliev A. P., Nikiforov L. A., Tarasova P. N., Laukkanen S. Effects of Surface Reactions during Friction on Tribological Characteristics of PTFE-Muscovite Composites. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1060, no. 1. doi: 10.1088/1757-899X/1060/1/012020
31. Ignat'eva L. N., Buznik V. M. IK-spektroskopicheskie issledovaniya politetraftoretilena i ego modifitsirovannykh form [IR spectroscopic studies of polytetrafluoroethylene and its modified forms]. *Rossiyskiy khimicheskiiy zhurnal* [Russian Journal of General Chemistry], 2008, vol. LII, no. 3, pp. 139–146.
32. Sun W., Liu X., Liu K., Xu J., Lu Y., Ye J. Mechanochemical Functionality of Graphene Additives in Ultralow Wear Polytetrafluoroethylene Composites. *Carbon*, 2021, vol. 184, pp. 312–321. doi: 10.1016/j.carbon.2021.08.042