

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВОЛЛАСТОНИТА ИЗ ТЕХНОГЕННОГО ОТХОДА НА СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА**

**С.Н. Данилова, П.Н. Тарасова, С.Б. Ярусова, Ю.В. Капитонова,  
В.Н. Осипова, А.А. Охлопкова, П.С. Гордиенко**

Сахаяна Николаевна Данилова (ORCID 0000-0002-5901-6387)\*, Прасковья Николаевна Тарасова, Юлия Валерьевна Капитонова, Валерия Николаевна Осипова, Айтилина Алексеевна Охлопкова

Химическое отделение, Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, ул. Кулаковского, 46, Якутск, Российская Федерация, 670000

E-mail: dsn.sakhayana@mail.ru\*, pn.tarasova@mail.ru, kapitonova-kirillina@mail.ru, valeriosaipova071@gmail.com, okhlopkova@yandex.ru

Софья Борисовна Ярусова (ORCID 0000-0002-1500-1319), Павел Сергеевич Гордиенко

Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук, пр. 100-летия Владивостока, 159, Владивосток, Российская Федерация, 690022

E-mail: yarusova\_10@mail.ru, pavel.gordienko@mail.ru

*В работе представлены результаты исследования синтетического волластонита из отходов производства борной кислоты (борогипса) на физико-механические и трибологические свойства полимерных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена. Волластонит синтезирован из борогипса путем его гидротермальной обработки в щелочной среде и последующего обжига полученного осадка при 900–1000 °С в течение 1 ч. Продукт с удельной поверхностью 1,4 м<sup>2</sup>/г и плотностью 3,06 г/см<sup>3</sup>, полученный в вышеуказанных режимах, характеризуется наличием волластонита триклинной модификации и наличием ангидрита CaSO<sub>4</sub>. Частицы волластонита имеют игольчатую форму с диаметром иголок ~100 нм. Показано, что игольчатые частицы волластонита соединены между собой и образуют конгломераты и агломераты размером от 10 до 70 мкм. Агломераты частиц характеризуются широким унимодальным распределением пор с максимумом 3,78 нм с конической и щелевидной формами. Установлено, что применение волластонита приводит к повышению износостойкости полимерных композиционных материалов на основе ПТФЭ. Композиты, наполненные 10 и 20 мас.% волластонита, характеризуются снижением скорости массового изнашивания в 700 раз относительно исходного полимера. Физико-механические исследования ПКМ показывают, что введение волластонита приводит к увеличению прочности при сжатии и модуля упругости. Однако зафиксировано снижение деформационно-прочностных показателей. Методом сканирующей электронной микроскопии выявлено формирование вторичных структур на поверхностях трения, которые играют роль в адаптации композита к изнашиванию. Методом ИК-спектроскопии поверхностей трения зафиксировано появление новых пиков, соответствующих гидроксильным, карбонильным и карбоксильным соединениям. Это указывает на определенный вклад частиц волластонита в трибохимические процессы.*

**Ключевые слова:** политетрафторэтилен, полимерные композиционные материалы, борогипс, волластонит, износостойкость, поверхность трения

**Для цитирования:**

Данилова С.Н., Тарасова П.Н., Ярусова С.Б., Капитонова Ю.В., Осипова В.Н., Охлопкова А.А., Гордиенко П.С. Оценка влияния волластонита из техногенного отхода на свойства полимерного композита на основе политетрафторэтилена. Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2024. Т. 67. Вып. 12. С. 102–112. DOI: 10.6060/ivkkt.20246712.7064.

**For citation:**

Danilova S.N., Tarasova P.N., Yarusova S.B., Kapitonova Yu.V., Osipova V.N., Okhlopkova A.A., Gordienko P.S. Evaluation of the influence of wollastonite from technogenic waste on the properties of a polymer composite based on polytetrafluoroethylene. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2024. V. 67. N 12. P. 102–112. DOI: 10.6060/ivkkt.20246712.7064.

## EVALUATION OF THE INFLUENCE OF WOLLASTONITE FROM TECHNOGENIC WASTE ON THE PROPERTIES OF A POLYMER COMPOSITE BASED ON POLYTETRAFLUOROETHYLENE

S.N. Danilova, P.N. Tarasova, S.B. Yarusova, Yu.V. Kapitonova,  
V.N. Osipova, A.A. Okhlopko, P.S. Gordienko

Sakhayana N. Danilova (ORCID 0000-0002-5901-6387)\*, Praskovya N. Tarasova, Yulia V. Kapitonova, Valeria N. Osipova, Aitalina A. Okhlopko

Department of Chemistry, North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, Kulakovskiy st., 46, Yakutsk, 670000, Russia

E-mail: dsn.sakhayana@mail.ru\*, pn.tarasova@mail.ru, kapitonova-kirillina@mail.ru, valeriaosipova071@gmail.com, okhlopko@yandex.ru,

Sofya B. Yarusova (ORCID 0000-0002-1500-1319), Pavel S. Gordienko

Institute of Chemistry, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Prosp. 100-letiya Vladivostoka, 159, Vladivostok, 690022, Russia

E-mail: yarusova\_10@mail.ru, pavel.gordienko@mail.ru

*The paper presents the results of a study of synthetic wollastonite from boric acid production waste (borogypsum) on the physical, mechanical and tribological properties of polymer composite materials based on polytetrafluoroethylene. Wollastonite was synthesized from borogypsum by its hydrothermal treatment in alkaline medium and subsequent calcination of the obtained precipitate at 900-1000 °C for 1 h. The product with a specific surface area of 1.4 m<sup>2</sup>/g and a density of 3.06 g/cm<sup>3</sup> obtained under the above regimes is characterized by the presence of wollastonite of triclinic modification and the presence of CaSO<sub>4</sub> anhydrite. The wollastonite particles are needle-shaped with a needle diameter of ~100 nm. Needle-shaped wollastonite particles are shown to be interconnected and form conglomerates and agglomerates ranging in size from 10 to 70 μm. Particle agglomerates are characterized by a wide unimodal distribution of pores with a maximum of 3.78 nm with conical and slit-like shapes. It was found that the use of wollastonite results in increased wear resistance of polymer composites based on PTFE. Composites filled with 10 and 20 wt.% of wollastonite are characterized by a 700-fold decrease in the rate of mass wear relative to the initial polymer. Physical and mechanical studies of PCM show that the introduction of wollastonite increases compressive strength and modulus of elasticity. However, a decrease in strain-strength parameters was observed. Scanning electron microscopy shows the formation of secondary structures on friction surfaces, which plays a role in the adaptation of the composite to wear. The method of IR spectroscopy of friction surfaces registered the appearance of new peaks corresponding to hydroxyl, carbonyl and carboxyl compounds. This indicates a certain contribution of wollastonite particles to tribochemical processes.*

**Keywords:** polytetrafluoroethylene, polymer composite materials, borogypsum, wollastonite, wear resistance, friction surface

### ВВЕДЕНИЕ

При изготовлении деталей узлов трения для автотранспорта и техники необходимо учитывать ряд факторов, которые, в основном, определяются условиями эксплуатации и требованиями к таким материалам. Основные характеристики материалов, используемых при изготовлении деталей узлов трения, устанавливаются выбором полимерной матрицы, как правило, обладающей уникальными триботехническими характеристиками.

Для изготовления материалов триботехнического назначения наиболее предпочтительным является политетрафторэтилен (ПТФЭ), который имеет превосходные антифрикционные и самосмазывающиеся свойства, является одним из распространенных конструкционных полимерных материалов, предназначенных для узлов трения. Однако, ПТФЭ имеет низкую износостойкость, вследствие чего полимерную матрицу необходимо модифицировать добавлением различных микро-

наноразмерных наполнителей и применением различных технологических приемов, включая механическую активацию, ультразвуковую обработку, обработку сверхвысокочастотным излучением и т.д. [1]. Чаще всего наполнителями для повышения износостойкости ПТФЭ выступают углеродные волокна, углеродные нанотрубки, дисульфид молибдена, слоистые силикаты, графит, бронза, оксиды циркония, титана и кремния в качестве мононаполнителей, так и в комбинации с другими наполнителями: частиц латуни, оксида алюминия, сульфида молибдена, графита и коротких углеродных волокон по отдельности [2], комбинации углеродного волокна, оксида циркония, оксида кремния и нитрида бора [3], неорганические частицы нанометрового размера и ультрадисперсные высокотвердые порошки [4], углеродные нанотрубки и другие углеродные наполнители [5], кремниевые пластины [6]. Однако для повышения несущей способности и износостойкости, уменьшения текучести под нагрузкой для армирования матрицы ПТФЭ предпочтительнее использовать игольчатые и волокнистые частицы благодаря тому, что наполнители такого вида придают жесткость, прочность, термо- и химическую стойкость полимерным материалам [7, 8]. Одним из таких перспективных наполнителей игольчатой формы является волластонит  $\text{Ca}_3[\text{Si}_3\text{O}_9]$ .

Отличительной особенностью структуры волластонита является его игольчатая форма кристаллов, благодаря чему предопределяется его эффективность применения в качестве армирующего компонента полимерных композиционных материалов (ПКМ) [9]. Использование игольчатого волластонита в композиционных материалах позволяет увеличить прочностные показатели полимерных композитов за счет повышения работы разрушения и торможения распространения трещины на границе волокон с матрицей.

Имеются работы по исследованию волластонита на свойства и структуру композитов на основе ПТФЭ. Например, в работе [10] исследовали композит ПТФЭ/волластонит в соотношении 90/10 по массе и оценивали его биосовместимость с эндотелиальными клетками. Установлено, что оптимальные физико-химические свойства и биосовместимость композита открывают перспективы применения материала в медицине, а также в областях, где к материалам предъявляются такие требования,

как высокая жесткость и термо- и морозостойкость. В работе [11] показано, что наполнение ПТФЭ волластонитом приводит к значительному повышению несущей способности и износостойкости. Было показано, что эти свойства также зависят от размера волокон волластонита. Композитные материалы при наполнении волокнами волластонита небольшого размера имеют показатели наименьшего износа при небольшой нагрузке 100-200 Н. При наполнении волластонитом с крупными размерами волокон получаемые ПКМ имеют большую несущую способность и высокую износостойкость в условиях тяжелого нагружения (до 300 Н).

Волластонит представляет собой метасиликат кальция  $\text{Ca}_3[\text{Si}_3\text{O}_9]$  (теоретический состав (в мас.%):  $\text{CaO} - 48,3$ ,  $\text{SiO}_2 - 51,7$ ), этот минерал встречается в щелочных магматических породах [12]. Известно, что на территории Российской Федерации имеется 30 месторождений и проявлений волластонита, которые находятся в Приморском крае, на Урале и в Республике Алтай и Саха (Якутия). Однако, эти месторождения волластонита не проработаны и не подготовлены для добычи и эксплуатации, хотя многие отрасли отечественного производства испытывают потребность в нем. Волластонит является уникальным наполнителем в материаловедении от полимеров до керамических изделий. Известно [13] применение волластонита для модификации электротехнического фарфора, в котором доказана его эффективность для интенсификации процессов растворения первичного муллита и кристаллизации игольчатого муллита. В связи с этим, актуальным является разработка простых и экономически целесообразных методов синтеза волластонита с возможностью варьирования физико-химических характеристик целевого продукта и его функциональных свойств. К преимуществам синтетического аналога данного минерала относятся отсутствие примесей, чистота продукта, его дисперсность и однородность химического состава. В настоящее время волластонит можно получить методами гидротермального синтеза (автоклавный) и низкотемпературного гидрохимического синтеза с последующей дегидратацией полученных гидросиликатов кальция, путем прямых твердофазных реакций, заключающихся в спекании кальций- и кремнийсодержащего сырья, а также расплавными методами получения. Выбор

способа синтеза определяется типом исходного сырья и требуемыми характеристиками конечного продукта [14].

Кроме природных месторождений волластонита, в нашей стране существует большое количество так называемых «техногенных месторождений», которые являются перспективным сырьем для синтеза волластонита, к числу которых относятся и гипсовые техногенные отходы (фосфогипс, борогипс) [15]. Ранее были проведены исследования, связанные с проблемой комплексной переработки борогипса, с получением силикатов кальция, в том числе, и волластонита, и калийных удобрений. Результаты экспериментальных работ показывают, что из данного типа гипсового техногенного сырья в зависимости от выбранных условий щелочной обработки возможно получение волластонита, в том числе, с игольчатой формой частиц (при автоклавной обработке отходов) [16, 17].

Авторами данной работы была отмечена перспектива применения синтетического волластонита с различной формой частиц и структурной модификацией, полученного как в модельных системах, так и из отходов, для армирования ПКМ на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ). При этом доказано, что введение волластонита в СВМПЭ обеспечивает повышение деформационно-прочностных параметров и износостойкости полимерных композитов [18-20].

Целью работы является оценка влияния волластонита из техногенного отхода – борогипса – на свойства и структуру политетрафторэтилена (ПТФЭ).

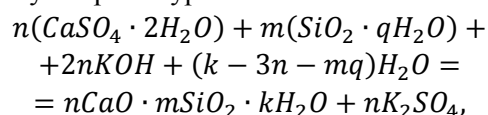
## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### *Материалы*

В качестве полимерной матрицы использовали политетрафторэтилен марки ПН-90 (Россия) со средним размером частиц 46-135 мкм (ГОСТ 10007-80).

Волластонит синтезировали в автоклаве Parr Instrument 4848 (USA) при температуре 220 °С в течение 3 ч. В качестве исходных компонентов для синтеза волластонита использовали борогипс из шламохранилища горно-химического комбината «Бор» (Приморский край, г. Дальнегорск) и раствор гидроксида калия марки «ч.д.а». Для синтеза компоненты смешивали в стехиометрическом соотношении. Борогипс представляет собой от-

ходы, образующиеся при сернокислотной обработке датолитового концентрата, в результате протекают реакции с образованием борной кислоты, аморфного диоксида кремния, сульфата кальция и сульфата железа (III). Поэтому считается, что система  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} - \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  является основным компонентом данных отходов, и в присутствии гидроксида калия в качестве щелочного агента (при pH = 13) процесс синтеза описывается следующим суммарным уравнением:



где n, m, q, k – стехиометрические коэффициенты,  $(2 + n + 1 = q + k)$ .

Далее продукт синтеза извлекали из автоклава и промывали его нагретой до 60-70 °С дистиллированной водой с последующим отделением через бумажный фильтр «синяя лента». Обжиг полученного осадка осуществляли в муфельной печи в интервале температур 900-1000 °С в течение 1 ч.

### *Изготовление ПКМ*

Исходный ПТФЭ перед изготовлением композитов сушили в печи ПЭ-0041 (Россия) при температуре 180 °С в течение 4 ч. Далее просушенный ПТФЭ измельчали на высокоскоростном смесителе и просеивали через сито С 12/38 с размером ячеек сетки 0,02-4,0 мм. Концентрация волластонита в ПТФЭ составила 0,5, 1, 2, 5, 10 и 20 мас.%. Смешение компонентов композита проводили в лопастном смесителе. Композиты изготавливали методом холодного прессования при удельном давлении 50 МПа со скоростью 0,45 МПа/с и выдержкой 2 мин. Спрессованные образцы спекали в программируемой печи SNOL 15/900 (Литва) со скоростью нагрева 2 °С/мин при температуре 375 °С и выдержкой 90 мин. Образцы для трибологических исследований калибровали следующим образом: образцы помещали в печь ES-4610 и нагревали до 180 °С с выдержкой 30 мин, затем прессовали под удельным давлением 50 МПа до остывания в пресс-форме.

### *Методы исследования*

В работе применялись следующие методы и оборудование:

- испытательная машина “Shimadzu AGS-J” (Япония) для исследования упруго-прочностных

свойств согласно ГОСТ 11262-80, ГОСТ 4651 и ГОСТ 9550;

- трибометр CETR UMT-3 (США) для исследования трибологических свойств ПКМ по схеме трения "палец-диск", скорость скольжения 96 об/мин, удельная нагрузка 160 Н, время трения – 3 ч;

- сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) JSM-7800F Jeol (Япония) для исследования морфологии порошков волластонита и поверхности трения композитов;

- дифрактометр D8 ADVANCE (Германия) для проведения рентгенофазового анализа с использованием программы поиска EVA с базой данных Powder Diffraction File TM (Soorya N Kabekkodu, 2007).

- анализатор удельной поверхности Quanta-chrome NOVAtouch LX (США) с применением газо-адсорбционного метода для измерения удельной поверхности и анализа пористости;

- пикнометр для определения плотности порошков волластонита согласно ГОСТ 22662-77.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рентгенофазовый анализ продукта обжига свидетельствует о формировании волластонита триклинной модификации (номер карты 00-027-0088) с параметрами кристаллической решетки:  $a = 7,92580$ ;  $b = 7,32020$ ;  $c = 7,06530$ ;  $\alpha = 90,055$ ;  $\beta = 95,217$ ;  $\gamma = 103,426$ , а также ангидрита  $\text{CaSO}_4$  (номер карты 00-037-1496) с параметрами кристаллической ячейки:  $a = 6,99330$ ;  $b = 7,00170$ ;  $c = 6,24110$ ;  $\alpha = 90,000$ ;  $\beta = 90,000$ ;  $\gamma = 90,000$ . Микрофотографии, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа, показывают (рис. 1), что волластонит состоит из агломератов игольчатых частиц с диаметром ~ от 190 до 230 нм и длиной ~ от 1 до 8 мкм. Плотность, определенная пикнометрическим методом, составляет  $3,06 \text{ г/см}^3$ .

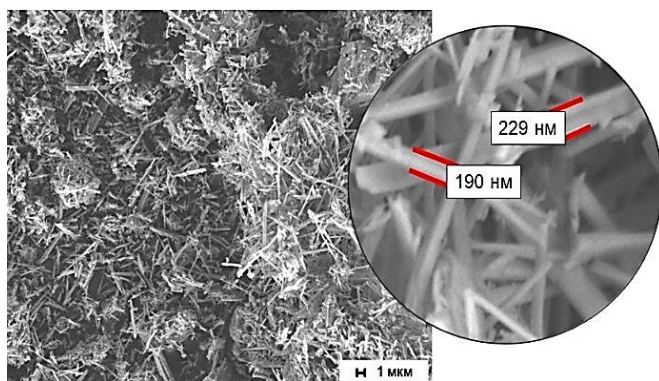


Рис. 1. Микрофотография волластонита  
Fig. 1. Micrograph of wollastonite

На рис. 2 приведена изотерма адсорбции-десорбции и распределение пор по размерам. Изотермы адсорбции синтетического волластонита по классификации ИЮПАК относятся к IV типу. Петли гистерезиса у порошка слабо выражены, форма петель относится к переходному типу от H3 к H1. Волластонит характеризуется как мезопористый материал с конической и щелевидной формами пор, с низкими значениями удельной поверхности [21].

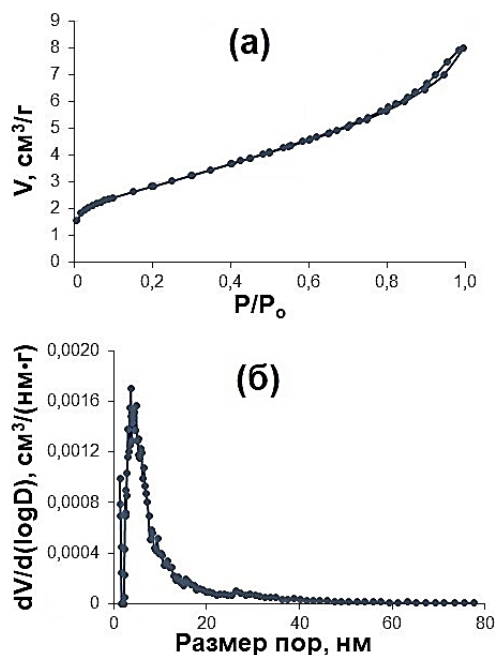


Рис. 2. Изотерма адсорбции-десорбции (а) и распределение пор по размерам (б)  
Fig. 2. Adsorption-desorption isotherm (a) and pore size distribution (б)

Данные распределения пор по размерам, полученные методом функционала плотности (DFT), указывают на широкое унимодальное распределение пор с максимумом, равным ~ 4 нм.

Таблица 1

#### Результаты исследований удельной поверхности и пористости волластонита

Table 1. Values of specific surface area and porosity of wollastonite

Параметры	Значения
$S_{\text{мезопор}}, \text{ м}^2/\text{г}$	1,4
$S_{\text{уд}}, \text{ м}^2/\text{г}$	1,4
$d_{\text{ср}}, \text{ нм}$	1530
$V_{\Sigma}, \text{ см}^3/\text{г}$	0,002

Примечание:  $S_{\text{мезопор}}$  и  $S_{\text{уд}}, \text{ м}^2/\text{г}$  – удельная поверхность;  $d_{\text{ср}}, \text{ нм}$  – средний размер микрокристаллитов,  $V_{\Sigma}, \text{ см}^3/\text{г}$  – суммарный объем пор

Note:  $S_{\text{мезопор}}$  and  $S_{\text{уд}}, \text{ м}^2/\text{г}$  – specific surface;  $d_{\text{ср}}, \text{ нм}$  – average size of microcrystallites,  $V_{\Sigma}, \text{ см}^3/\text{г}$  – total pore volume

Далее провели исследования по влиянию волластонита на физико-механические свойства ПТФЭ, результаты которых представлены на рис. 3.

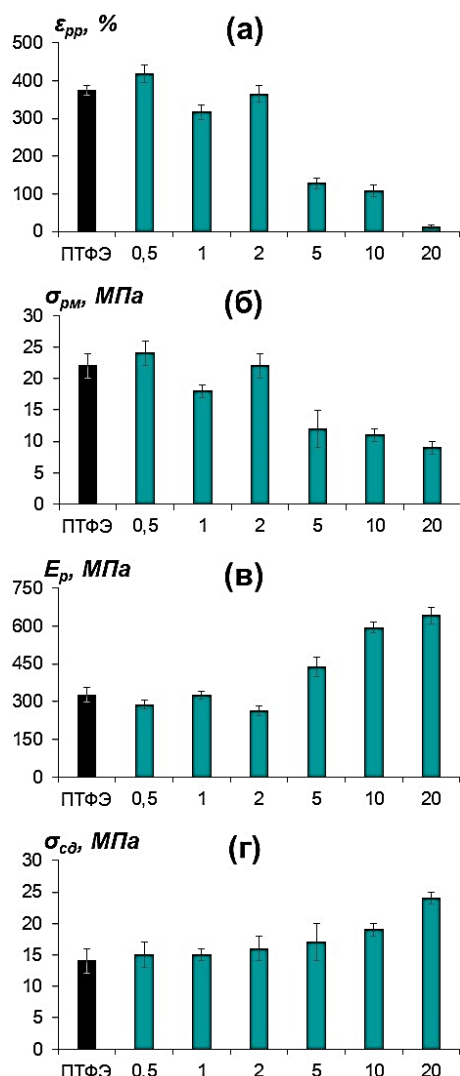


Рис. 3. Зависимость деформационно-прочностных характеристик ПКМ от содержания  $\text{Ca}_3[\text{Si}_3\text{O}_9]$ : (а)  $\epsilon_{pp}$ , % – относительное удлинение при разрыве; (б)  $E_r$ , МПа – модуль упругости; (в)  $\sigma_{pm}$ , МПа – предел прочности при растяжении; (г)  $\sigma_{cd}$ , МПа – прочности при сжатии при установленной относительной деформации 10%

Fig. 3. Dependence of the deformation-strength characteristics of PCM on the  $\text{Ca}_3[\text{Si}_3\text{O}_9]$  content: (a)  $\epsilon_{pp}$ , % – relative elongation at break; (б)  $E_r$ , МПа – modulus of elasticity; (в)  $\sigma_{pm}$ , МПа – ultimate tensile strength; (г)  $\sigma_{cd}$ , МПа – compressive strength at a set relative deformation of 10%

Установлено, что при введении волластонита в матрицу наблюдается снижение показателей деформационно-прочностных характеристик относительно ненаполненного ПТФЭ. Так, зафиксировано снижение относительного удлинения при разрыве в ~40 раз и предела прочности при растяжении в 3 раза. Уменьшение значений эластичности

и прочности композитов обусловлено нарушением целостности матрицы при добавлении волластонита. Так, частицы наполнителя механически затрудняют подвижность макромолекул ПТФЭ при растяжении, при этом они также могут являться дополнительными центрами формирования микротрещин, где может возникнуть разрушающее напряжение [22]. Однако, выявлено, что ПКМ, наполненный 20 мас.% волластонита, характеризуется увеличением модуля упругости на ~90% и прочности при сжатии при установленной деформации 10% на ~70%. Это свидетельствует о повышении жесткости и нагрузочной способности композиционного материала. Увеличение модуля упругости объясняется различием жесткости матрицы и волластонита, так как волокна имеют большую жесткость, и, следовательно, меньше растягиваются из-за их хрупкой природы [23]. В свою очередь, повышение прочности при сжатии обусловлено увеличением содержания волластонита, так как при сжатии уплотняется структура ПКМ, при этом волластонит воспринимает сжимающую нагрузку.

Результаты трибологических исследований из табл. 2 свидетельствуют о том, что добавление волластонита сопровождается снижением скорости массового изнашивания в ~700 раз по сравнению с исходным ПТФЭ.

Таблица 2

Результаты трибологических исследований ПКМ в зависимости от содержания волластонита  
Table 2. Results of tribological studies of PCM depending on the content of wollastonite

Матрица	Содержания волл., мас.%	Скорость массового изнашивания, мг/ч	Коэффициент трения
ПТФЭ	—	120 ± 6	0,19 ± 0,01
	0,5	13,4 ± 0,7	0,17 ± 0,01
	1	6,1 ± 0,3	0,18 ± 0,01
	2	1,8 ± 0,1	0,23 ± 0,01
	5	0,57 ± 0,02	0,21 ± 0,01
	10	0,18 ± 0,01	0,23 ± 0,01
	20	0,17 ± 0,01	0,24 ± 0,02

Видно, что с увеличением концентрации наполнителя в полимерной матрице ПТФЭ приводит к некоторому повышению коэффициента трения. ПКМ, наполненный 20 мас.% волластонита, характеризуется повышением коэффициента трения на ~20% по сравнению с ненаполненным ПТФЭ. Повышение износостойкости при введении волластонита может быть связано с уменьшением

деформируемости ПКМ и формированием на поверхности трения стабильной пленки переноса на поверхности стального контртела за счет наличия частиц волластонита [24]. В то же время, частицы волластонита в процессе изнашивания локализируются на поверхности трения, вследствие чего трение сопровождается с изменением интенсивности трибохимических реакций. Однако некоторая часть волластонита может полностью отделиться от композита из-за отсутствия адгезии с ПТФЭ, который в дальнейшем при трении может способствовать повышению термического напряжения в зоне трибоконтакта и коэффициента трения [25]. Это объясняется тем [26], что наличие атомов фтора в макромолекуле ПТФЭ делает его практически инертным, поэтому трудно получить однородную композиционную смесь, при этом полимер не взаимодействует с наполнителями. Таким образом, в системе “ПТФЭ-наполнитель” наблюдается образование механического сцепления.

Из промышленно выпускаемых материалов на основе ПТФЭ широко известны композиты, содержащие стекло- и углеволокна. Введение стекловолокна в ПТФЭ (Ф4С15) сопровождается повышением износостойкости в  $\sim 250$  раз, однако наблюдается значительное повышение коэффициента трения на  $\sim 300\%$  и снижение прочностных показателей. Стеклофторопласты марок Ф4С15М5 и Ф4С17М3 дополнительно содержат в своем составе дисульфид молибдена, который относится к антифрикционным наполнителям, способствующим снижению коэффициента трения. Введение углеродных волокон способствует повышению антифрикционных свойств ПТФЭ гораздо эффективнее, чем при введении стеклянных волокон. В настоящее время наиболее известны промышленные материалы марок «Флубон» и «Флувис», армированные углеволокнами. Основным недостатком данных материалов является высокая стоимость углеродных волокон по сравнению с другими видами модификаторов. Кроме того, при изготовлении этих марок композитов используются дополнительные приемы модификации волокон, включая плазмохимическую обработку, что предопределяет высокую стоимость конечного продукта. Из проделанного сравнительного анализа видно, что модификация ПТФЭ игольчатым волластонитом эффективно повышает износостойкость и жесткость композитов, при этом не зафиксировано существенное увеличение коэффициента трения по сравнению с ПКМ, наполненных другими видами волокнистых наполнителей. Проведенные исследова-

ния интересны и с точки зрения решения перехода на отечественные аналоги, поскольку показывают перспективу использования российского техногенного сырья для получения волластонитсодержащего наполнителя.

Для более подробного объяснения изменения трибологических свойств ПКМ провели исследования поверхностей трения ПКМ, результаты которых представлены на рис. 4. На ИК спектрах (рис. 4) зафиксированы два интенсивных пика в области  $1148$  и  $1205$   $\text{см}^{-1}$ , относящиеся к асимметричным и симметричным колебаниям  $-\text{CF}_2-$ , которые относятся к самому исходному ПТФЭ. Примечательно, что наблюдается также незначительные пики в областях при  $553$  и  $631$   $\text{см}^{-1}$ , которые соответствуют веерным и деформационным колебаниям связей  $-\text{CF}_2$  [27].

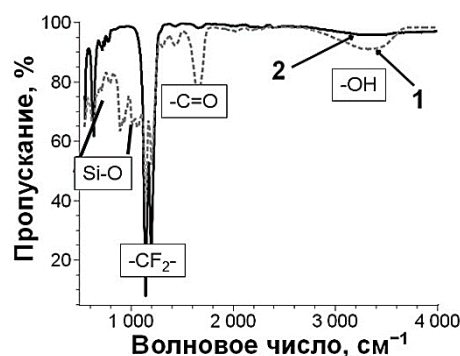


Рис. 4. ИК спектры поверхности трения: 1 – исходного ПТФЭ; 2 – композита с 20 мас.% содержанием волластонита  
Fig. 4. IR spectra of the friction surface: 1 – initial PTFE; 2 – composite with 20 wt.% wollastonite content

На ИК спектрах ПКМ с волластонитом наблюдается появление пиков в области  $890$ – $1080$   $\text{см}^{-1}$ , вызванных асимметричными и симметричными колебаниями связи  $\text{Si}-\text{O}$ . В области меньших волновых чисел при  $550$ – $750$   $\text{см}^{-1}$  проявляются пики, которые соответствуют колебаниям связей  $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$  в  $[\text{SiO}_4]$  – тетраэдрах, а также изгибным колебаниям  $\text{Si}-\text{O}$  связи и валентным колебаниям  $\text{Ca}-\text{O}$  связей в  $[\text{CaO}_6]$  – октаэдрах пироксеноидной цепочки волластонита. Данные пики подтверждают локализацию волластонита на поверхности трения композита. Кроме этого, на ИК спектрах обнаружены новые пики в области  $1313$ ,  $1431$  и  $1661$   $\text{см}^{-1}$ , которые соответствуют солям карбоновых кислот и отвечают за асимметричные и симметричные колебания двух равноценных связей  $-\text{C}=\text{O}$  карбоксилат-анионов [28]. Наблюдаемая широкая полоса поглощения в области  $2783$ – $3624$   $\text{см}^{-1}$  относится к колебаниям фрагментальных ассоциированных гидроксильных групп. Такие пики свиде-

тельствует о протекании трибоокислительных реакций при изнашивании ПТФЭ с участием кислорода воздуха и металлов стального контртела с формированием вторичных структур на поверхности трения [29]. Известно [30, 31], что окисление ПТФЭ сопровождается разрывом связи С-Ф и С-С с образованием активных центров, которые могут переходить в гидроксильные, карбонильные и карбоксильные соединения. В работе [32] указано, что фторалкильные заместители в карбонильных соединениях способствуют образованию стабильных первичных пероксидных структур, поэтому промежуточный продукт не только образует продукты окисления, но и соли перфторкарбоновых кислот при взаимодействии с катионами металлов стального контртела.

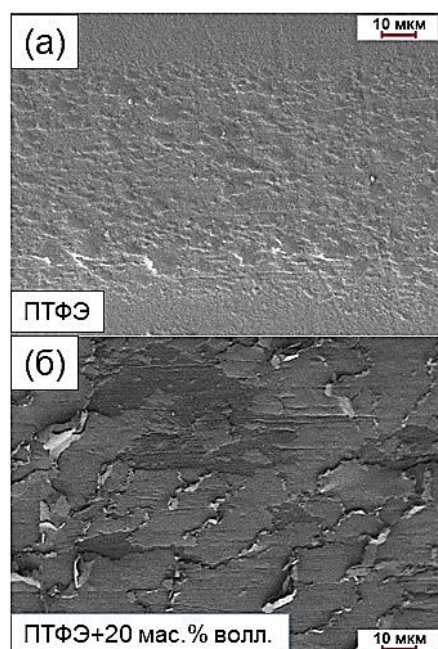


Рис. 5. Морфология поверхности трения: (а) – исходного ПТФЭ; (б) – композита с 20 мас.% содержания волластонита  
Fig. 5. Morphology of the friction surface: (a) – initial PTFE; (b) – composite with 20 wt.% wollastonite content

Структура поверхности исходного ПТФЭ на рис. 5 (а) отличается наличием наплывов за счет налипания полимера на металл и деформации поверхностного слоя, что свидетельствует об адгезионном износе. Вследствие этого, исходный ПТФЭ имеет низкие показатели износостойкости, поэтому вводят модифицирующие наполнители, которые приводят к формированию на поверхности трения износостойкой вторичной структуры. Это подтверждается микрофотографиями поверхности трения ПКМ (рис. 5 (б)), где зафиксировано формирование четко выраженных вторичных струк-

тур, образно называемых “чешуйками”, похожие результаты были выявлены в работе [33]. Таким образом, введение волластонита в ПТФЭ сопровождается интенсификацией трибохимических процессов, способствующих формированию вторичных “чешуйчатобразных” структур, которые приводят к повышению износостойкости ПКМ.

## ВЫВОДЫ

Установлено, что синтезированный из борогипса волластонит характеризуется игольчатой формой частиц со средним размером диаметра ~ от 190 до 230 нм и длиной ~ от 1 до 8 мкм. Фазовый состав свидетельствует о формировании волластонита триклинной модификации с удельной поверхностью 1,4 м<sup>2</sup>/г и плотностью 3,06 г/см<sup>3</sup>. В результате комплексного исследования свойств ПКМ на основе ПТФЭ и волластонита установлено, что при введении волластонита наблюдается повышение износостойкости примерно в 700 раз относительно исходного ПТФЭ при некотором снижении показателей деформационно-прочностных характеристик ПКМ. Установлено, что с увеличением содержания волластонита наблюдается повышение модуля упругости на ~ 90% и прочности при сжатии композита на ~ 70%. Исследование структуры поверхностей трения композитов методами СЭМ и ИКС выявило формирование на поверхности трения ПКМ, наполненного волластонитом, вторичных структур из элементов трибосопряжения, продуктов износа и трибоокисления, которые защищают материал от дальнейшего износа.

## БЛАГОДАРНОСТИ

*Синтез и характеристика наполнителя выполнены в рамках гос. задания ИХ ДВО РАН, проект FWFN(0205)-2022-0002. Исследование свойств и структуры ПКМ выполнены при финансовой поддержке МНУВО РФ НИР № FSRG-2023-0026.*

*The synthesis and characterization of the filler were carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Crystallography of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, project FWFN (0205) -2022-0002. The study of the properties and structure of PCMs was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Research No. FSRG-2023-0026.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.*

*The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.*



## ЛИТЕРАТУРА

1. **Смелов А.В.** Механические свойства и трибологические возможности модифицированного политетрафторэтилена. *Совр. Probl. науки и образования*. 2012. Вып. 6. С. 73-73.
2. **Lin Z., Zhang K., Ye J., Li X., Zhao X., Qu T., Liu Q., Gao B.** The effects of filler type on the friction and wear performance of PEEK and PTFE composites under hybrid wear conditions. *Wear*. 2022. V. 490. P. 204178. DOI: 10.1016/j.wear.2021.204178.
3. **Vasilev A.P., Lazareva N.N., Struchkova T.S., Okhlopkova A.A., Danilova S.N.** Mechanical and Tribological Properties of Polytetrafluoroethylene Modified with Combined Fillers: Carbon Fibers, Zirconium Dioxide, Silicon Dioxide and Boron Nitride. *Polymers*. 2023. V. 15. N 2. P. 313. DOI: 10.3390/polym15020313.
4. **Кахраманов Н.Т., Касумова Г.Ш., Осипчик В.С., Гаджиева Р.Ш.** Износостойкие полимерные материалы. Структура и свойства. *Пласт. массы*. 2017. Вып. 11-12. С. 8-15. DOI: 10.35164/0554-2901-2017-11-12-8-15.
5. **Makowiec M.E., Blanchet T.A.** Improved wear resistance of nanotube-and other carbon-filled PTFE composites. *Wear*. 2017. V. 374. P. 77-85. DOI: 10.1016/j.wear.2016.12.027.
6. **Vishal K., Rajkumar K., Sabarinathan P.** Effect of recovered silicon filler inclusion on mechanical and tribological properties of polytetrafluoroethylene (PTFE) composite. *Silicon*. 2022. V. 14. N 9. P. 4601-4610. DOI: 10.1007/s12633-021-01250-w.
7. **Васильев А.П., Стручкова Т.С., Охлопкова А.А., Алексеев А.Г.** Исследование влияния углеродных и базальтовых волокон с ультрадисперсным ПТФЭ на триботехнические свойства политетрафторэтилена. *ЮСНВ*. 2020. Вып. 1. С. 89-95.
8. **Машков Ю.К., Овчар З.Н., Суриков В.И.** Композиционные материалы на основе политетрафторэтилена. Структурная модификация. М.: Машиностроение. 2005. 240 с.
9. **Tulyaganov D.U., Dimitriadis K., Agathopoulos S., Baino F., Fernandes H.R.** Wollastonite-containing glass-ceramics from the CaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> and CaO–MgO–SiO<sub>2</sub> ternary systems. *Open Ceram*. 2023. P. 100507. DOI: 10.1016/j.oceram.2023.100507.
10. **Risbud M.V., Hambir S., Jog J., Bhonde R.** Biocompatibility assessment of polytetrafluoroethylene/wollastonite composites using endothelial cells and macrophages. *J. Biomater. Sci. Polym. Edit*. 2001. V. 12. N 11. P. 1177-1189. DOI: 10.1163/156856201753395734.
11. **Yu J.H., Li C., Yao Q.S.** Study on the performance of wollastonite modified PTFE composite material. *AMR*. 2015. V. 1089. P. 28-32. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1089.28.
12. **Souza D.N., Melo A.P., Caldas L.V.E.** TL and TSEE response of Wollastonite–Teflon composites in X-ray beams. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2007. V. 580. N 1. P. 338-341. DOI: 10.1016/j.nima.2007.05.170.
13. **Верещагин В.И., Курбанбаев М.Е., Есимов Б.О., Роот Л.О., Могилевская Н.В.** Процессы спекания, фазообразования, формирование структуры и свойства электротехнического фарфора с использованием маршаллита и добавок wollastonита. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2024. Т. 67. Вып. 5. С. 87-98. DOI: 10.6060/ivkkt.20246705.6960.
14. **Ярусова С.Б., Гордиенко П.С., Папынов Е.К., Шичалин О.О., Буравлев И.Ю., Иванец А.И., Григорян К.Г., Хачатрян А.А., Жевтун И.Г., Охлопкова А.А., Данилова С.Н.** Функциональные керамические и композитные материалы практического назначения: синтез,

## REFERENCES

1. **Smelov A.V.** Mechanical properties and tribological capabilities of modified polytetrafluoroethylene. *Sovremen. Probl. Nauki Obrazov*. 2012. N 6. P. 73-73 (in Russian).
2. **Lin Z., Zhang K., Ye J., Li X., Zhao X., Qu T., Liu Q., Gao B.** The effects of filler type on the friction and wear performance of PEEK and PTFE composites under hybrid wear conditions. *Wear*. 2022. V. 490. P. 204178. DOI: 10.1016/j.wear.2021.204178.
3. **Vasilev A.P., Lazareva N.N., Struchkova T.S., Okhlopkova A.A., Danilova S.N.** Mechanical and Tribological Properties of Polytetrafluoroethylene Modified with Combined Fillers: Carbon Fibers, Zirconium Dioxide, Silicon Dioxide and Boron Nitride. *Polymers*. 2023. V. 15. N 2. P. 313. DOI: 10.3390/polym15020313.
4. **Kahramanov N.T., Kasumova G.Sh., Osipchik V.S., Gadzhieva R.Sh.** Wear-resistant polymer materials. Structure and properties. *Plast. Massy*. 2017. N 11-12. P. 8-15 (in Russian). DOI: 10.35164/0554-2901-2017-11-12-8-15.
5. **Makowiec M.E., Blanchet T.A.** Improved wear resistance of nanotube-and other carbon-filled PTFE composites. *Wear*. 2017. V. 374. P. 77-85. DOI: 10.1016/j.wear.2016.12.027.
6. **Vishal K., Rajkumar K., Sabarinathan P.** Effect of recovered silicon filler inclusion on mechanical and tribological properties of polytetrafluoroethylene (PTFE) composite. *Silicon*. 2022. V. 14. N 9. P. 4601-4610. DOI: 10.1007/s12633-021-01250-w.
7. **Vasilyev A.P., Struchkova T.S., Okhlopkova A.A., Alekseev A.G.** Study of the influence of carbon and basalt fibers with ultrafine PTFE on the tribological properties of polytetrafluoroethylene. *YuSNV*. 2020. N 1. P. 89-95 (in Russian).
8. **Mashkov Yu.K., Ovchar Z.N., Surikov V.I.** Composite materials based on polytetrafluoroethylene. Structural modification. M.: Mashinostroenie. 2005. 240 p. (in Russian).
9. **Tulyaganov D.U., Dimitriadis K., Agathopoulos S., Baino F., Fernandes H.R.** Wollastonite-containing glass-ceramics from the CaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> and CaO–MgO–SiO<sub>2</sub> ternary systems. *Open Ceram*. 2023. P. 100507. DOI: 10.1016/j.oceram.2023.100507.
10. **Risbud M.V., Hambir S., Jog J., Bhonde R.** Biocompatibility assessment of polytetrafluoroethylene/wollastonite composites using endothelial cells and macrophages. *J. Biomater. Sci. Polym. Edit*. 2001. V. 12. N 11. P. 1177-1189. DOI: 10.1163/156856201753395734.
11. **Yu J.H., Li C., Yao Q.S.** Study on the performance of wollastonite modified PTFE composite material. *AMR*. 2015. V. 1089. P. 28-32. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1089.28.
12. **Souza D.N., Melo A.P., Caldas L.V.E.** TL and TSEE response of Wollastonite–Teflon composites in X-ray beams. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2007. V. 580. N 1. P. 338-341. DOI: 10.1016/j.nima.2007.05.170.
13. **Vereshchagin V.I., Kurbanbayev M.Y., Yessimov B.O., Root L.O., Mogilevskaya N.V.** Sintering processes, phase and structure formation and properties of electrical porcelain with the use of marshallit and wollastonite additives. *Chem-ChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2024. V. 67. N 5. P. 87-98 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20246705.6960.
14. **Yarusova S.B., Gordienko P.S., Papynov E.K., Shichalin O.O., Buravlev I.Yu., Ivanets A.I., Grigoryan K.G., Khachatryan A.A., Zhevtun I. O.G., Okhlopkova A.A., Danilova S.N.** Functional ceramic and composite materials

- свойства, применение. Глава 3. Синтез волластонита и функциональных материалов на его основе с использованием отходов. Владивосток: Изд-во ВВГУ. 2022. 240 с. DOI: 10.12466/0677-0-2022.
15. **Ярусова С.Б., Гордиенко П.С., Жевтун И.Г., Буравлев И.Ю.** Получение синтетического волластонита с использованием гипсового техногенного сырья. Тез. докл. Конгресса с международным участием и конференции молодых ученых «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований»: «ТЕХНОГЕН-2019». Екатеринбург: УрО РАН. 2019. С. 182–184.
  16. **Yarusova S.B., Gordienko P.S., Sharma Y.C., Perfilev A.V., Kozin A.V.** Industrial waste as raw material for producing synthetic wollastonite in Russia. *Int. J. Environ. Sci. Develop.* 2017. V. 8. N 1. P. 1–5. DOI: 10.18178/ijesd.2017.8.1.910.
  17. **Ярусова С.Б., Гордиенко П.С.** Комплексная переработка гипсовых промышленных отходов с получением функциональных материалов. Сб. докл. Межд. конф. «Современные проблемы комплексной и глубокой переработки минерального сырья природного и техногенного происхождения. Плаксинские чтения – 2022». Владивосток: Изд-во ДВФУ. 2022. С. 412–415. DOI: 10.24866/7444-5340-4.
  18. **Данилова С.Н., Ярусова С.Б., Охлопкова А.А., Гордиенко П.С., Лазарева Н.Н.** Волластонит, полученный в модельной системе  $\text{CaCl}_2\text{-Na}_2\text{SiO}_3\text{-H}_2\text{O}$ , как модификатор сверхвысокомолекулярного полиэтилена. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2023. Т. 66. Вып. 1. С. 105–113. DOI: 10.6060/ivkkt.20236601.6681.
  19. **Danilova S.N., Yarusova S.B., Kulchin Y.N., Zhevtun I.G., Buravlev I.Y., Okhlopkova A.A., Gordienko P.S., Subbotin E.P.** UHMWPE/ $\text{CaSiO}_3$  nanocomposite: mechanical and tribological properties. *Polymers.* 2021. V. 13. N 4. P. 570. DOI: 10.3390/polym13040570.
  20. **Данилова С.Н., Ярусова С.Б., Буравлев И.Ю., Слепцова С.А., Игнатьева Е.Г., Ягофаров В.Ю., Гордиенко П.С., Охлопкова А.А.** Модифицирование СВМПЭ волластонитом, синтезированным из отходов борного производства. *Полимер. материалы и технологии.* 2021. Т. 7. Вып. 1. С. 71. DOI: 10.32864/polymmattech-2021-7-1-71-82.
  21. **Гаврилова Н.Н., Назаров В.В.** Анализ пористой структуры на основе адсорбционных данных. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева. 2015. 132 с.
  22. **Mazur K., Gądek-Moszczak A., Liber-Kneć A., Kuciel S.** Mechanical behavior and morphological study of polytetrafluoroethylene (PTFE) composites under static and cyclic loading condition. *Materials.* 2021. V. 14. N 7. P. 1712. DOI: 10.3390/ma14071712.
  23. **Bandaru A.K., Khan A.N., Durmaz T., Alagirusamy R., O'Higgins R.M.** Improved mechanical properties of multi-layered PTFE composites through hybridization. *Construct. Build. Mater.* 2023. V. 374. P. 130921. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130921.
  24. **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. *Вестн. Сев.-Вост. Фед. Ун-та им. М.К. Аммосова.* 2015. Т. 48. Вып. 4. С. 51–63.
  25. **Okhlopkova A.A., Danilova S.N., Dyakonov A.A., Vasilev A.P., Tuisov A.G., Kychkin A.K.** Tribological Properties of Composites Based on a UHMWPE Modified Borpolymer. *Wear.* 2022. V. 43. N 1. P. 27–34. DOI: 10.3103/S1068366622010081.
- for practical purposes: synthesis, properties, application. Chap. 3. Synthesis of wollastonite and functional materials based on it using waste: monografiya. Vladivostok: Izd-vo VVGU. 2022. 240 p. (in Russian). DOI: 10/12466/0677-0-2022.
15. **Yarusova S.B., Gordienko P.S., Zhevtun I.G., Buravlev I.Yu.** Production of synthetic wollastonite using gypsum technogenic raw materials. Abstract of the report of the Congress with international participation and conference of young scientists "Fundamental research and applied development of the processes of processing and utilization of technogenic formations": «TEKHNOGEN-2019». Ekaterinburg: UrO RAN. 2019. P. 182–184 (in Russian).
  16. **Yarusova S.B., Gordienko P.S., Sharma Y.C., Perfilev A.V., Kozin A.V.** Industrial waste as raw material for producing synthetic wollastonite in Russia. *Int. J. Environ. Sci. Develop.* 2017. V. 8. N 1. P. 1–5. DOI: 10.18178/ijesd.2017.8.1.910.
  17. **Yarusova S.B., Gordienko P.S.** Complex processing of gypsum industrial waste to produce functional materials. Collection of reports of the Int. Conf. "Modern problems of complex and deep processing of mineral raw materials of natural and man-made origin. Plaksinskies chteniya – 2022». Vladivostok: Izd-vo DVFU. 2022. P. 412–415 (in Russian). DOI: 10.24866/7444-5340-4.
  18. **Danilova S.N., Yarusova S.B., Okhlopkova A.A., Gordienko P.S., Lazareva N.N.** Wollastonite obtained in the model system  $\text{CaCl}_2\text{-Na}_2\text{SiO}_3\text{-H}_2\text{O}$  as a modifier of ultra-high molecular weight polyethylene. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Tekhnol.].* 2023. V. 66. N 1. P. 105–113 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20236601.6681.
  19. **Danilova S.N., Yarusova S.B., Kulchin Y.N., Zhevtun I.G., Buravlev I.Y., Okhlopkova A.A., Gordienko P.S., Subbotin E.P.** UHMWPE/ $\text{CaSiO}_3$  nanocomposite: mechanical and tribological properties. *Polymers.* 2021. V. 13. N 4. P. 570. DOI: 10.3390/polym13040570.
  20. **Danilova S.N., Yarusova S.B., Buravlev I.Yu., Sleptsova S.A., Ignatieva E.G., Yagofarov V.Yu., Gordienko P.S., Okhlopkova A.A.** Modification of UHMWPE with wollastonite synthesized from boron production waste. *Polim. Mater. Tekhnol.* 2021. V. 7. N 1. P. 71 (in Russian). DOI: 10.32864/polymmattech-2021-7-1-71-82.
  21. **Gavrilova N.N., Nazarov V.V.** Analysis of porous structure based on adsorption data. M.: RKhTU im. D.I. Mendeleeva. 2015. 132 p. (in Russian).
  22. **Mazur K., Gądek-Moszczak A., Liber-Kneć A., Kuciel S.** Mechanical behavior and morphological study of polytetrafluoroethylene (PTFE) composites under static and cyclic loading condition. *Materials.* 2021. V. 14. N 7. P. 1712. DOI: 10.3390/ma14071712.
  23. **Bandaru A.K., Khan A.N., Durmaz T., Alagirusamy R., O'Higgins R.M.** Improved mechanical properties of multi-layered PTFE composites through hybridization. *Construct. Build. Mater.* 2023. V. 374. P. 130921. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130921.
  24. **Okhlopkova A.A., Struchkova T.S., Alekseev A.G., Vasilev A.P.** Development and research of polymer composite materials based on the activation of polytetrafluoroethylene and carbon fillers. *Vestn. SVFU.* 2015. V. 48. N 4. P. 51–63 (in Russian).
  25. **Okhlopkova A.A., Danilova S.N., Dyakonov A.A., Vasilev A.P., Tuisov A.G., Kychkin A.K.** Tribological Properties of Composites Based on a UHMWPE Modified Borpolymer. *Wear.* 2022. V. 43. N 1. P. 27–34. DOI: 10.3103/S1068366622010081.

26. Marshall J.E., Zhenova A., Roberts S., Petchey T., Zhu P., Dancer C.E., McElroy C.R., Kendrick E., Goodship V. On the solubility and stability of polyvinylidene fluoride. *Polymers*. 2021. V. 13. N. 9. P. 1354. DOI: 10.3390/polym13091354.
27. Piowarczyk J., Jędrzejewski R., Moszyński D., Kwiatkowski K., Niemczyk A., Baranowska J. XPS and FTIR studies of polytetrafluoroethylene thin films obtained by physical methods. *Polymers*. 2019. V. 11. N 10. P. 1629. DOI: 10.3390/polym11101629.
28. Novak U., Grdadolnik J. Infrared Spectra of Hydrogen Bond Network in Lamellar Perfluorocarboxylic Acid Monohydrates. *Spectrochim. Acta Pt. A: Molec. Biomolec. Spectrosc.* 2021. V. 253. P. 119551. DOI: 10.1016/j.saa.2021.119551.
29. Kapitonova Iu.V., Lazareva N.N., Tarasova P.N., Okhlopkova A.A., Laukkanen S., Mukhin V.V. Morphology analysis of friction surfaces of composites based on PTFE and layered silicates. *Polymers*. 2022. V. 14. N 21. P. 4658. DOI: 10.3390/polym14214658.
30. Sleptsova S.A., Lazareva N.N., Fedoseeva V.I., Kapitonova Yu.V., Okhlopkova A.A. The Influence of Metal Cations of Mechanoactivated Bentonite on Tribochemical Processes in PTFE. *Wear*. 2018. V. 39. N 6. P. 469-475. DOI: 10.3103/S1068366618060120.
31. 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. *Wear*. 2016. V. 37. P. 129-135. DOI: 10.3103/S106836661602015X.
32. Чапуркин В.В., Медведев В.П., Чапуркин С.В. Особенности синтеза первичных пероксидных производных реакции фторсодержащих карбонильных соединений с пероксидом водорода. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2015. Т. 58. Вып. 10. С. 21-24.
33. Слепцова С.А., Лазарева Н.Н., Федосеева В.И., Капитонова Ю.В., Охлопкова А.А. Влияние катионов металлов механоактивированного бентонита на трибохимические процессы в ПТФЭ. *Трение и износ*. 2018. Т. 39. Вып. 6. С. 604-611. DOI: 10.3103/S1068366618060120.
26. Marshall J.E., Zhenova A., Roberts S., Petchey T., Zhu P., Dancer C.E., McElroy C.R., Kendrick E., Goodship V. On the solubility and stability of polyvinylidene fluoride. *Polymers*. 2021. V. 13. N. 9. P. 1354. DOI: 10.3390/polym13091354.
27. Piowarczyk J., Jędrzejewski R., Moszyński D., Kwiatkowski K., Niemczyk A., Baranowska J. XPS and FTIR studies of polytetrafluoroethylene thin films obtained by physical methods. *Polymers*. 2019. V. 11. N 10. P. 1629. DOI: 10.3390/polym11101629.
28. Novak U., Grdadolnik J. Infrared Spectra of Hydrogen Bond Network in Lamellar Perfluorocarboxylic Acid Monohydrates. *Spectrochim. Acta Pt. A: Molec. Biomolec. Spectrosc.* 2021. V. 253. P. 119551. DOI: 10.1016/j.saa.2021.119551.
29. Kapitonova Iu.V., Lazareva N.N., Tarasova P.N., Okhlopkova A.A., Laukkanen S., Mukhin V.V. Morphology analysis of friction surfaces of composites based on PTFE and layered silicates. *Polymers*. 2022. V. 14. N 21. P. 4658. DOI: 10.3390/polym14214658.
30. Sleptsova S.A., Lazareva N.N., Fedoseeva V.I., Kapitonova Yu.V., Okhlopkova A.A. The Influence of Metal Cations of Mechanoactivated Bentonite on Tribochemical Processes in PTFE. *Wear*. 2018. V. 39. N 6. P. 469-475. DOI: 10.3103/S1068366618060120.
31. 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. *Wear*. 2016. V. 37. P. 129-135. DOI: 10.3103/S106836661602015X.
32. Чапуркин В.В., Медведев В.П., Чапуркин С.В. Features of the synthesis of primary peroxide derivatives of the reaction of fluorine-containing carbonyl compounds with hydrogen peroxide. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2015. V. 58. N 10. P. 21-24 (in Russian).
33. Sleptsova S.A., Lazareva N.N., Fedoseeva V.I., Kapitonova Yu.V., Okhlopkova A.A. Influence of metal cations of mechanically activated bentonite on tribochemical processes in PTFE. *Trenie Iznos*. 2018. V. 39. N 6. P. 604-611 (in Russian). DOI: 10.3103/S1068366618060120.

Поступила в редакцию 06.02.2024

Принята к опубликованию 09.04.2024

Received 06.02.2024

Accepted 09.04.2024