

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УГЛЕРОДНЫХ И БАЗАЛЬТОВЫХ ВОЛОКОН С УЛЬТРАДИСПЕРСНЫМ ПТФЭ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА

А.П. Васильев, Т.С. Стручкова, А.А. Охлопкова, А.Г. Алексеев

«Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова», г. Якутск

В данной работе исследовано влияние комбинирования углеродных и базальтовых волокон с УПТФЭ в качестве наполнителя ПТФЭ на механические и триботехнические свойства композитов на их основе. Показано, что при введении комбинированных волокнистых наполнителей с УПТФЭ в ПТФЭ приводит к увеличению напряжения при сжатии и модуля упругости. В случае композитов с механически активированным базальтовым волокном модуль упругости при сжатии сохраняется на уровне исходного полимера. Методом рентгеноструктурного анализа показано, что при введении наполнителей степень кристалличности композитов повысилась, плотность композитов снизилась относительно ненаполненного ПТФЭ. Исследование триботехнических характеристик полимерных композиционных материалов, наполненных углеродными волокнами и комбинированными волокнами с УПТФЭ показало, что износостойкость композитов значительно повышается по сравнению с исходным ПТФЭ при сохранении низкого коэффициента трения. Сравнительный анализ композитов показал, что композиты с механически активированным базальтовым волокном обладают износостойкостью в 800 раз выше чем у исходного полимера, и в 2 раза выше относительно ПТФЭ, наполненного углеродными волокнами. Износостойкость композитов с механически активированным базальтовым волокном на 20-25% выше относительно образцов с комбинированными наполнителями без механической активации. Методом электронной микроскопии показано, что основным фактором улучшения износостойкости композитов является образование прочными волокнами препятствий деформированию и перемещению локальных областей полимерной матрицы под действием сдвиговых напряжений. Показано, что высокая износостойкость композитов с механической активацией базальтового волокна относительно других образцов, возможно, обусловлена образованием износостойких вторичных структур на поверхности трения.

Ключевые слова: ПТФЭ, углеродное волокно, базальтовое волокно, ПКМ, износостойкость.

ВВЕДЕНИЕ

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) широко применяются в качестве уплотнительных элементов в герметизирующих устройствах. Политетрафторэтилен (ПТФЭ) среди промышленно выпускаемых полимеров отличается высокой химической и термической стойкостью, низкой поверхностной энергией и коэффициентом трения [1]. Однако высокая скорость изнашивания и низкая твердость ненаполненного ПТФЭ ограничивает его использование в качестве материала герметизирующего и триботехнического назначения [2]. Одним из способов улучшения эксплуатационных свойств ПТФЭ является модификация полимера введением различных твердых наполнителей [3].

Известно, что повышение износостойкости и твердости ПТФЭ достигается при введении высокопрочных волокнистых наполнителей: углеродных волокон (УВ), стекловолокон (СВ), базальтовых волокон (БВ) и арамидных волокон (АВ) [4-6]. Волокнистые наполнители для разработки ПКМ триботехнического назначения обычно используют в виде коротких (измельченных) волокон [7]. В работе [6], в качестве наполнителя ПТФЭ использовали

измельченные, а также механоактивированные базальтовые волокна. Показано, что при введении 2 мас.% БВ с предварительной механоактивацией в ПТФЭ приводит к существенному улучшению износостойкости и повышению нагрузочной способности материала. Известно, что модификация ПТФЭ углеродными волокнами приводит к значительному улучшению износостойкости и нагрузочной способности ПКМ [8]. Показано, что прочные углеродные волокна при трении выступают на поверхности трения и воспринимают фрикционные нагрузки, снижая изнашивание композита. Однако, волокнистые материалы, вводимые в ПТФЭ, из-за высокой твердости могут абразивно воздействовать на стальное контртело. Поэтому, обычно вместе с волокнистыми наполнителями в полимерную матрицу вводят антифрикционные частицы (графит, MoS_2 и др.) [9]. Среди наполнителей антифрикционного назначения особый интерес представляют дисперсные продукты, получаемые из ПТФЭ, так называемые ультрадисперсные ПТФЭ (УПТФЭ) [10]. В работе [11] показано, что введение УПТФЭ в композиции ПТФЭ+УВ улучшает комплекс свойств, и может использоваться как многофункциональный наполнитель для композитов на основе ПТФЭ,

благодаря близкому молекулярному строению к полимерной матрице.

В последнее время большой интерес представляют полимеры, армированные путём комбинирования волокон, в том числе углеродных волокон с базальтовыми волокнами [12-14]. В работе [15], исследованы композиты на основе ПТФЭ, наполненного УВ и АВ, с дополнительным содержанием графита и наноразмерного SiO₂ и их комбинаций. Показано, что композиты, содержащие УВ совместно с АВ демонстрируют наиболее высокую износостойкость по сравнению с образцами, содержащими один тип волокон. Несмотря на большое количество работ по исследованию влияния волокнистых наполнителей на триботехнические свойства ПТФЭ, мало работ посвящено изучению влияния комбинированных волокон с предварительной механической активацией и УПТФЭ на триботехнические свойства ПТФЭ.

Цель работы – исследование влияния комбинированных наполнителей углеродных волокон с базальтовыми волокнами и ультрадисперсным ПТФЭ на физико-механические и триботехнические свойства политетрафторэтилена.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Полимерной матрицей служил ПТФЭ марки ПН-90 («ГалоПолимер», Россия). Плотность 2,16 г/см³, размер частиц 46–135 мкм. В качестве углеродного наполнителя использованы модифицированные короткие углеродные волокна (УВ) марки «Белум» (ОАО «Светлогорск Химволокно», Беларусь). Волокна модифицированы плазмохимически в среде фторорганических соединений. Технология модифицирования волокон разработана в ГНУ ИММС им. В.А. Белого НАН Беларуси. Длина УВ варьируется в пределах 50-500 мкм, а их диаметр 4,5–10,0 мкм. Базальтовые волокна (БВ) производства «Сахабазальт» (Россия), волокна измельчены в мельнице Fritsch Pulverizette 15 с установленным ситом размерностью 0,25 мм. Длина БВ варьируется в пределах 30-90 мкм, а их диаметр 8,0-10,0 мкм. Механическую активацию (м/а) БВ проводили в планетарной мельнице Активатор-2S (Россия) в течение 2 мин. Наполнителем для улучшения антифрикционных свойств использовали ультрадисперсный модифицированный порошок политетрафторэтилена «ФОРУМ» (Ф), (Институт химии ДВО РАН). Представляет собой порошок со сферическими частицами размером 0,1-1,0 мкм.

Обозначение состава композитов, число мас.% содержание наполнителя. Образцы изготовлены по стандартной технологии переработки ПТФЭ: смешение компонентов в высокоскоростном лопастном смесителе, прессование на гидравлическом прессе при удельном давлении 50 МПа и спекание в программируемой печи SNOL 180/400 при 375 °С.

Физико-механические характеристики ПТФЭ и ПКМ определены согласно ГОСТ 4651-2014, использованы образцы в виде прямого цилиндра с диаметром 10,00 ± 0,01 мм, скорость испытания 1 мм/мин на универсальной испытательной машине Autograf AGS-J (Shimadzu, Япония). Плотность ПТФЭ и ПКМ определяли согласно ГОСТ 15139-69.

Триботехнические характеристики исследованы на трибомашине UMT-3 (CETR, США) при трении скольжения без смазочного материала по схеме трения палец – диск. Диаметр образцов 10,0 ± 0,1 мм, длина 20,0 ± 1,0 мм. Коэффициент трения ПТФЭ и ПКМ определяли по программе CETR Data Viewer 2.19. Контртело – стальной диск из стали марки 45 с твердостью 45–50 HRC, шероховатость R_a = 0,06–0,08 мкм. Нормальная нагрузка – 160 Н, линейная скорость скольжения – 0,2 м/с. Время испытания 3 часа. Скорость массового изнашивания рассчитывали по формуле: I = Δm/h (мг/ч).

На рентгеновском порошковом дифрактометре ARL X'TRA («Thermo Fisher Scientific», Швейцария) определяли степень кристалличности ПТФЭ и ПКМ по соотношению площадей рефлексов, соответствующих аморфным и кристаллическим областям. В качестве образцов использованы пластины с размером 30×30 мм, с толщиной 3,2 ± 0,2 мм. На сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) JSM-7800F LV («JEOL», Япония) проведены исследования поверхностей трения ПКМ.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В табл. 1 приведены результаты исследования физико-механических свойств и плотность ПТФЭ и ПКМ на его основе.

Табл. 1. Результаты напряжения при сжатии, модуля упругости и плотности ПТФЭ и ПКМ

Образец	σ _{сж} , МПа	E _с , МПа	ρ, г/см ³
ПТФЭ исходный	15 ± 1	350 ± 22	2,16
ПТФЭ/10УВ/1Ф	22 ± 1	409 ± 19	2,02
ПТФЭ/10УВ/2Ф	19 ± 1	386 ± 26	2,01
ПТФЭ/8УВ/2БВ/1Ф	25 ± 1	518 ± 27	2,05
ПТФЭ/8УВ/2БВ/2Ф	23 ± 1	454 ± 24	2,04
ПТФЭ/8УВ/2БВ/1Ф м/а	24 ± 1	376 ± 21	2,03
ПТФЭ/8УВ/2БВ/2Ф м/а	23 ± 1	368 ± 20	2,04

Примечание: σ_{сж} – напряжение при сжатии при установленной относительной деформации 10%; E_с – модуль упругости при сжатии; ρ – плотность.

Как видно из табл. 1, напряжение при сжатии во всех композитах повысилось относительно исходного ПТФЭ. Видно, что ПКМ с комбинированными волокнами характеризуются более высокими показателями напряжения при сжатии при установленной относительной деформации 10% по сравнению с ПТФЭ, наполненного только УВ. В композитах с комбинированием наполнителей напряжение при сжатии при установленной относительной деформации 10% выше исходного ПТФЭ на ~60%, что свидетельствует об усилении полимерной матрицы.

Значение модуля упругости ПКМ с комбинированными волокнами без механоактивации БВ и ПТФЭ/10УВ/1Ф выше исходного ПТФЭ на 67%, 29% и 16%, соответственно. В случае ПТФЭ/10УВ/2Ф и ПКМ с предварительно механоактивированным БВ значение модуля упругости сохраняется на уровне исходного ПТФЭ. Относительно низкий показатель модуля упругости в ПКМ с механоактивированным БВ и УПТФЭ, возможно, обусловлено уменьшением размеров частиц волокон в процессе механической активации.

Стоит отметить, что во всех исследованных композитах наблюдается тенденция снижения напряжения при сжатии и модуля упругости ПКМ при увеличении содержания УПТФЭ с 1 до 2 мас.%. Подобное изменение свойств ПКМ, возможно, связано с тем, что УПТФЭ при введении в ПТФЭ действует как пластификатор, вследствие снижаются показатели напряжения при сжатии и модуль упругости [16].

Из табл. 1 видно, что введение наполнителей в ПТФЭ приводит к снижению плотности. Снижение показателя плотности ПКМ по сравнению с исходным ПТФЭ, возможно, связано с низкой плотностью УВ (1,45 г/см³). Некоторое повышение плотности ПТФЭ/УВ/БВ/Ф по сравнению с ПТФЭ/УВ/Ф, возможно, связано с тем, что базальтовые волокна характеризуются более высокой плотностью (2,6-2,8 г/см³) по сравнению с УВ. На рис. 1 представлены результаты степени кристалличности ПТФЭ и ПКМ.

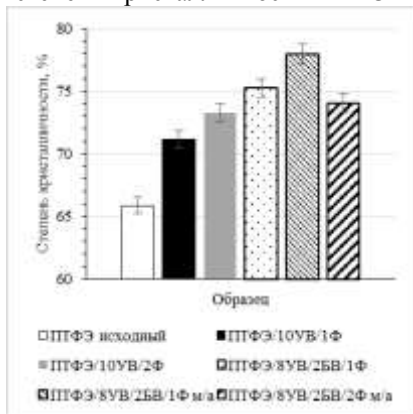


Рис. 1. Степень кристалличности ПТФЭ и ПКМ

Значение степени кристалличности ПКМ (рис.1) при введении комбинированных наполнителей существенно повышается по сравнению с исходным ПТФЭ. Это связано с тем, что при введении в ПТФЭ волокон с ультрадисперсным ПТФЭ, последнее приводит к пластифицированию граничных слоев, что сопровождается интенсификацией процесса кристаллизации полимерной матрицы [11].

В табл. 2 приведены результаты исследования триботехнических характеристик ПТФЭ и ПКМ в зависимости от состава наполнителей.

Табл. 2. Результаты скорости массового изнашивания и коэффициента трения ПТФЭ и ПКМ

Образец	I , мг/ч	f
ПТФЭ исходный	120,00	0,22
ПТФЭ/10УВ/1Ф	0,28	0,21
ПТФЭ/10УВ/2Ф	0,32	0,19
ПТФЭ/8УВ/2БВ/1Ф	0,21	0,22
ПТФЭ/8УВ/2БВ/2Ф	0,20	0,23
ПТФЭ/8УВ/2БВ/1Ф м/а	0,17	0,23
ПТФЭ/8УВ/2БВ/2Ф м/а	0,15	0,22

Примечание: I – скорость массового изнашивания; f – коэффициент трения.

Результаты триботехнических исследований показали, что при введении наполнителей в ПТФЭ приводит к увеличению износостойкости ПКМ при сохранении низкого значения коэффициента трения (табл. 2). Видно, что ПКМ с содержанием УВ, износостойкость повысилась в 375-430 раза относительно исходного ПТФЭ. В случае введения комбинированных наполнителей (УВ/БВ/Ф) в ПТФЭ приводит к снижению скорости массового изнашивания в 570-600 раза по сравнению с исходной полимерной матрицей. Наилучшие показатели износостойкости получены в композитах с механоактивированным БВ, где износостойкость повысилась в 705-800 раз относительно исходного ПТФЭ. Износостойкость композитов с механоактивированным БВ практически в 2 раза выше по сравнению с ПТФЭ/УВ/Ф, а также на 20-25% выше ПТФЭ/УВ/БВ/Ф при сохранении коэффициента трения на уровне исходного ПТФЭ.

Таким образом, из приведенных данных видно, что наилучшие показатели по физико-механическим и триботехническим характеристикам получены в композитах с механоактивированным БВ.

На рис. 2 представлены результаты исследования поверхностей трения ПКМ методом сканирующей электронной микроскопии.

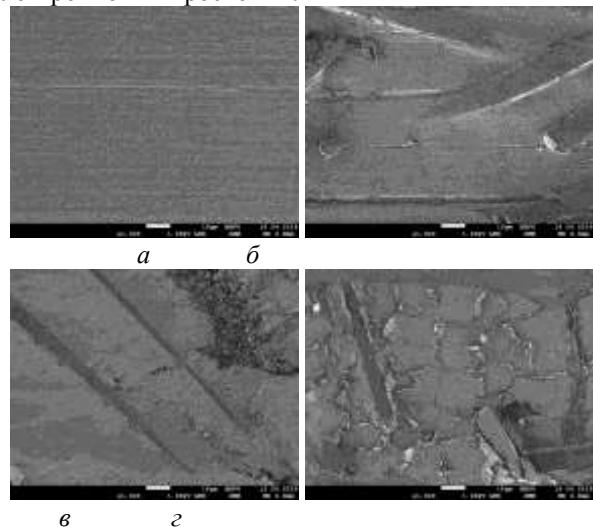


Рис. 2. Микрофотографии поверхностей трения ПКМ: а) ПТФЭ/10УВ/2Ф (×150); б) ПТФЭ/10УВ/2Ф (×1000); в) ПТФЭ/8УВ/2БВ/2Ф (×150); г) ПТФЭ/8УВ/2БВ/2Ф (×1000); д) ПТФЭ/8УВ/2БВ/2Ф 2 мин м/а (×150); д) ПТФЭ/8УВ/2БВ/2Ф 2 мин м/а (×1000)

Из рис. 2 видно, что во всех исследованных композитах волокна на поверхности трения ПКМ достаточно равномерно распределены. Очевидно, что улучшение износостойкости ПКМ связано с тем, что прочные УВ и БВ на поверхности трения препятствуют деформированию и перемещению локальных областей полимерной матрицы под действием сдвиговых напряжений [17]. В ПТФЭ+УВ+Форум на поверхности трения видны борозды вдоль направления скольжения, поверхность между бороздами относительно гладкая. В композитах с комбинированными волокнами (УВ+БВ+Ф) на поверхности трения не наблюдается образование бороздок и поверхность относительно гладкая. В случае ПКМ с механоактивированным БВ на поверхности трения видно, что область между волокнами фрагментируется на структурные элементы в виде «чешуек», которые вероятно являются вторичными структурами [18]. Как видно, образование вторичных структур приводит к значительному увеличению износостойкости ПКМ с механоактивированным БВ. Так, в композитах ПТФЭ/УВ/Ф и ПТФЭ/УВ/БВ/Ф не наблюдается образование подобных структурных образований на поверхности трения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, при введении УВ, БВ и УПТФЭ в ПТФЭ приводит к улучшению напряжения при сжатии и увеличению степени кристалличности относительно полимерной матрицы. Модуль упругости ПКМ зависит от содержания УПТФЭ и механоактивации БВ, показано, что в ПТФЭ/УВ/БВ/Ф с 2 мин м/а модуль упругости остается на уровне исходной полимерной матрицы. В случае ПТФЭ/УВ/БВ/Ф без механоактивации модуль упругости повысился на 67% относительно исходного ПТФЭ.

Износостойкость всех исследованных ПКМ повысилась относительно исходного ПТФЭ, при сохранении низкого значения коэффициента трения. В ПТФЭ/8УВ/2БВ/2Ф 2 мин м/а скорость массового изнашивания снизилась в 800 раз. Показано, что подобное изменение износостойкости ПКМ обусловлено образованием износостойких вторичных структур на поверхности трения.

Разработанные материалы могут быть использованы в качестве материалов уплотнительного назначения и деталей узлов трения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Campbell K.L., Sidebottom M.A., Atkinson C.C., Babuska T.F., Kolanovic S.A., Boulden B.J., ... & Krick B.A. Ultralow Wear PTFE-Based Polymer Composites—The Role of Water and Tribochemistry // *Macromolecules*. – 2019. – Vol. 52. – №. 14. – p. 5268-5277.
2. Wu H., Zhu L.N., Yue W., Fu Z.Q., Kang J.J. Wear-resistant and hydrophobic characteristics of PTFE/CF composite coatings // *Progress in Organic Coatings*. – 2019. – Vol. 128. – p. 90-98.

3. Makowiec M. E., Blanchet T. A. Improved wear resistance of nanotube-and other carbon-filled PTFE composites // *Wear*. – 2017. – Vol. 374. – p. 77-85.

4. 5. Li Z., Liu J., Yuan Y., Li E., Wang F. Effects of surface fluoride-functionalizing of glass fiber on the properties of PTFE/glass fiber microwave composites // *RSC Advances*. – 2017. – Vol. 7. – №. 37. – p. 22810-22817.

5. Охлопкова А.А. Базальтофторопластовые композиты антифрикционного назначения / А.А. Охлопкова, С.В. Васильев, П.Н. Петрова, А.Л. Федоров, А.Г. Туисов // *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова*. – 2013. – Т. 10. – №. 5. – С. 30-36.

6. Bolvari A., Glenn S., Janssen R., Ellis C. Wear and friction of aramid fiber and polytetrafluoroethylene filled composites // *Wear*. – 1997. – Vol. 203. – p. 697-702.

7. Friedrich K. Polymer composites for tribological applications // *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. – 2018. – Vol. 1. – №. 1. – p. 3-39.

8. Ohlopkova A.A., Struchkova T.S., Vasilev A.P., Alexeev A.G. Studying the properties and structure of polytetrafluoroethylene filled with Belum modified carbon fibers // *Journal of Friction and Wear*. – 2016. – Vol. 37. – №. 6. – p. 529-534.

9. Omrani, Emad, Pradeep K. Rohatgi, and Pradeep L. Menezes. *Tribology and Applications of Self-Lubricating Materials*. CRC Press, 2017.

10. Бузник В.М. Новые наноразмерные и микроразмерные объекты на основе политетрафторэтилена // *Российские нанотехнологии*. – 2009. – Т. 4. – №. 11-12. – С. 35-41.

11. Авдейчик С.В., Струк В.А., Воропаев В.В. Технологические принципы формирования высокопрочных износостойких фторкомпозитов / С.В. Авдейчик, В.А. Струк, В.В. Воропаев // *Пластические массы*. – 2013. – №. 12. – С. 3-8.

12. Sun G., Tong S., Chen D., Gong Z., Li Q. Mechanical properties of hybrid composites reinforced by carbon and basalt fibers // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2018. – Vol. 148. – p. 636-651.

13. Şahin Y., Şahin F. Dry Wear Behavior of Basalt/Carbon-Reinforced Epoxy Composite by Taguchi Method // *Fracture, Fatigue and Wear*. – Springer, Singapore, 2018. – p. 581-590.

14. Khalili S.M.R., Najafi M., Eslami-Farsani R. Effect of thermal cycling on the tensile behavior of polymer composites reinforced by basalt and carbon fibers // *Mechanics of Composite Materials*. – 2017. – Vol. 52. – №. 6. – p. 807-816.

15. Fan X., Guo Y., Zhang L., Xu Y., Zhao F., Zhang G.. Role of reinforcement types and silica nanoparticles on tribofilm growth at PTFE-Steel interface // *Tribology International*. – 2020. – Vol. 143. – p. 106035.

16. Васильев А.П. Разработка антифрикционных материалов на основе политетрафторэтилена с углеродными волокнами / А.П. Васильев, А.А. Охлопкова, Т.С. Стручкова, А.Г. Алексеев, З.С. Иванова // *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова*. – 2017. – №. 3 (59). – С. 39-47.

17. Воропаев В.В. Технология формирования высокопрочных износостойких фторкомпозитов / В.В. Воропаев, С.В. Авдейчик, В.А. Струк // *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук*. – 2014. – №. 1. – С. 51-59.

18. Vasilev A.P., Okhlopkova A.A., Struchkova T.S., Grakovich P.N., Bashlakova A.L. Investigation of the Influence of Complex Fillers on the Properties and Structure of Polytetrafluoroethylene // *Journal of Friction and Wear*. – 2018. – Vol. 39. – №. 5. – p. 427-432.

Васильев Андрей Петрович – ведущий инженер УНТЛ «Технологии полимерных нанокompозитов», Института естественных наук, ФГАОУ ВО СВФУ им. М.К. Аммосова, тел. +79248694792, e-mail: gtvap@mail.ru.

Стручкова Татьяна Семеновна – к.т.н., доцент химического отделения Института естественных наук, ФГАОУ ВО СВФУ им. М.К. Аммосова, e-mail: sts_23@mail.ru.

Охлопкова Айталина Алексеевна – д.т.н., профессор, главный научный сотрудник УНТЛ «Технологии полимерных нанокмозитов», Института естественных наук, ФГАОУ ВО СВФУ им. М.К. Аммосова, e-mail: okhlopkova@yandex.ru.

Алексеев Алексей Гаврильевич – старший преподаватель химического отделения Института естественных наук, ФГАОУ ВО СВФУ им. М.К. Аммосова, e-mail: alex.alekseev.z@gmail.com.

STUDY OF THE INFLUENCE OF CARBON AND BASALT FIBERS WITH ULTRADISPERSE PTFE ON THE TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF POLYTETRAFLUOROETHYLENE

A.P. Vasilev, T.S. Struchkova, A.A. Okhlopkova, A.G. Alekseev

North-Eastern federal university, Yakutsk

In this paper, we studied the effect of combining carbon and basalt fibers with UPTFE on the mechanical and tribological properties of PTFE. It is shown that the introduction of combined fibrous fillers with UPTFE in PTFE leads to an increase in compressive stress and elastic modulus. In the case of composites with mechanical activation of basalt fiber, the compression modulus is maintained at the level of the initial polymer. Structural studies showed that with the introduction of fillers, the degree of crystallinity of the composites increased, the density of the composites decreased relative to unfilled PTFE. The results of the study of tribological tests of polymer composite materials filled with carbon fibers and combined fibers with UPTFE are presented. It has been shown that the wear resistance of composites increases significantly compared to the initial PTFE while maintaining a low coefficient of friction. A comparative analysis of the composites showed that composites with mechanical activation of basalt fiber have a wear resistance higher than the starting polymer by 800 times and to 2-time relative PTFE filled with carbon fibers. The wear resistance of composites with mechanical activation of basalt fiber is 20–25% higher relative to samples with combined fillers without mechanical activation. Microscopic studies have shown that the main factor in improving the wear resistance of composites is the formation by strong fibers of obstacles to the deformation and displacement of local areas of the polymer matrix under the action of shear stresses. It is shown that the high wear resistance of composites with mechanical activation of basalt fiber relative to other samples is possibly due to the formation of wear-resistant secondary structures on the worn surface.

Index terms: PTFE, carbon fibers, basalt fibers, PCM, wear resistance.

REFERENCES

1. Campbell K.L. Sidebottom M.A., Atkinson C.C., Babuska T.F., Kolanovic C.A., Boulden B.J., ... & Krick B.A. Ultralow Wear PTFE-Based Polymer Composites—The Role of Water and Tribochemistry // *Macromolecules*. – 2019. – Vol. 52. – №. 14. – p. 5268-5277.
2. Wu H., Zhu L.N., Yue W., Fu Z.Q., Kang J.J. Wear-resistant and hydrophobic characteristics of PTFE/CF composite coatings // *Progress in Organic Coatings*. – 2019. – Vol. 128. – p. 90-98.
3. Makowiec M. E., Blanchet T. A. Improved wear resistance of nanotube-and other carbon-filled PTFE composites // *Wear*. – 2017. – Vol. 374. – p. 77-85.
4. Li Z., Liu J., Yuan Y., Li E., Wang F. Effects of surface fluoride-functionalizing of glass fiber on the properties of PTFE/glass fiber microwave composites // *RSC Advances*. – 2017. – Vol. 7. – №. 37. – p. 22810-22817.
5. Ohlopkova A.A. Bazal'tofteroplastovye kompozity antifrikcionnogo naznachenija [Basalt-fluoroplastic composites of antifrictional assignment] / A.A. Ohlopkova, S.V. Vasil'ev, P.N. Petro-va, A.L. Fedorov, A.G. Tuisov // *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. MK Ammosova*. – 2013. – T. 10. – №. 5. – S. 30-36.
6. Bolvari A., Glenn S., Janssen R., Ellis C. Wear and friction of aramid fiber and polytetrafluoroethylene filled composites // *Wear*. – 1997. – Vol. 203. – p. 697-702.
7. Friedrich K. Polymer composites for tribological applications // *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. – 2018. – Vol. 1. – №. 1. – p. 3-39.
8. Ohlopkova A.A. Struchkova T.S., Vasilev A.P., Alexeev A.G. Studying the properties and structure of polytetrafluoroethylene filled with Belum modified carbon fibers // *Journal of Friction and Wear*. – 2016. – Vol. 37. – №. 6. – p. 529-534.
9. Omrani, Emad, Pradeep K. Rohatgi, and Pradeep L. Menezes. *Tribology and Applications of Self-Lubricating Materials*. CRC Press, 2017.
10. Бузник В.М. Новые наноразмерные и микроразмерные объекты на основе политетрафторэтилена // *Российские нанотехнологии*. – 2009. – Т. 4. – №. 11-12. – С. 35-41.
11. Avdejchik S.V., Struk V.A., Voropaev V.V. Tehnologicheskie principy formirovanija vysokoprochnyh iznosostojkih ftorkompozitov [Technological principles of high wear-resistant PTFE-based composites production] / S.V. Avdejchik., V.A. Struk, V.V. Voropaev // *Plasticheskie massy*. – 2013. – №. 12. – S. 3-8.
12. Sun G., Tong S., Chen D., Gong Z., Li Q. Mechanical properties of hybrid composites reinforced by carbon and basalt fibers // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2018. – Vol. 148. – p. 636-651.
13. Şahin Y., Şahin F. Dry Wear Behavior of Basalt/Carbon-Reinforced Epoxy Composite by Taguchi Method // *Fracture, Fatigue and Wear*. – Springer, Singapore, 2018. – p. 581-590.
14. Khalili S. M. R., Najafi M., Eslami-Farsani R. Effect of thermal cycling on the tensile behavior of polymer composites reinforced by basalt and carbon fibers // *Mechanics of Composite Materials*. – 2017. – Vol. 52. – №. 6. – p. 807-816.
15. Fan X., Guo Y., Zhang L., Xu Y., Zhao F., Zhang G.. Role of reinforcement types and silica nanoparticles on tribofilm growth at PTFE-Steel interface // *Tribology International*. – 2020. – Vol. 143. – p. 106035.
16. Vasil'ev A.P. Razrabotka antifrikcionnyh materialov na osnove politetrafortjetilena s uglerodnymi voloknami [Development of antifriction materials based on polytetrafluorethylene with carbon fibers] / A.P. Vasil'ev, A.A. Ohlopkova, T.S. Struchkova, A.G. Alekseev, Z.S. Ivanova // *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. MK Ammosova*. – 2017. – №. 3 (59). – С. 39-47.
17. Voropaev V.V. Tehnologija formirovanija vysokoprochnyh iznosostojkih ftorkompozitov [A technology of high wear- and stress-resistant PTFE-based composites production] / V.V. Voropaev, S.V. Avdejchik, V.A. Struk // *Izvestija Nacional'noj akademii nauk Belarusi. Serija fiziko-tehnicheskikh nauk*. – 2014. – №. 1. – S. 51-59.
18. Vasilev A.P., Okhlopkova A.A., Struchkova T.S., Grakovich P.N., Bashlakova A.L. Investigation of the Influence of Complex Fillers on the Properties and Structure of Polytetrafluoroethylene // *Journal of Friction and Wear*. – 2018. – Vol. 39. – №. 5. – p. 427-432.

Vasiliev Andrei Petrovich - leading engineer of the educational, scientific and technological laboratory "Technology of polymer nanocomposites", Institute of Natural Sciences, NEFU, tel. +7 924 869 4792, e-mail: givap@mail.ru.

Struchkova Tatyana Semenovna - candidate of technical sciences, associate professor of the Chemical Department of the Institute of Natural Sciences, NEFU, e-mail: sts_23@mail.ru.

Okhlopkova Aytalina Alekseevna - Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Scientific Researcher of the Educational, scientific and technological laboratory "Technology of polymer nanocomposites", Institute of Natural Sciences, NEFU, e-mail: okhlopkova@yandex.ru.

Alekseev Aleksey Gavrilievich - Senior Lecturer in the Chemical Department of the Institute of Natural Sciences, NEFU, e-mail: alex.alekseev.z@gmail.com.