



Научная статья
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)
УДК 678.743.41

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.03.034



СОВМЕСТНОЕ ВЛИЯНИЕ БАЗАЛЬТОВЫХ И УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН НА СВОЙСТВА И СТРУКТУРУ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА

Александр Александрович Ушканов¹, Надежда Николаевна Лазарева²,
Айталиа Алексеевна Охлопкова³, Андрей Петрович Васильев⁴

^{1, 2, 3, 4} Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск, Россия

¹ alexanderushkanov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5638-8399>

² lazareva-nadia92@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5090-0793>

³ okhlopkova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0691-7066>

⁴ gtvap@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7699-533X>

Аннотация. Проведены исследование и разработка полимерных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена с добавлением базальтовых и углеродных волокон (соотношение 1:1) в диапазоне от 0,1 до 5 масс.%. Результаты исследования показали заметное улучшение характеристик полимерных композитов при совместном использовании волокон. В частности, было выявлено, что прочность композиционных материалов на сжатие увеличивается до 23 % при относительной нагрузке 10 %. Кроме того, износостойкость композитов увеличивается в 91 раз, при этом их коэффициент трения остается на уровне, сопоставимом с ненаполненным полимером. Структурные исследования показали, что при введении наполнителя происходит трансформация надмолекулярной структуры полимера. Волокна находятся в полимере в хаотичном порядке как в объеме материала, так и на поверхности трения композитов. Инфракрасная спектроскопия позволила зафиксировать протекание трибохимических реакций на поверхности трения образцов, что подчеркивает важность данного эффекта для взаимодействия материалов в процессе эксплуатации. Показано повышение термодинамических параметров композитов. Таким образом, разработанные полимерные композиционные материалы обладают уникальными свойствами, что открывает новые перспективы в области использования этих материалов в различных промышленных сферах.

Ключевые слова: политетрафторэтилен, углеродные волокна, полимерный композиционный материал, арматура, связующее, износостойкость, коэффициент трения, прочность.

Для цитирования: Ушканов А. А., Лазарева Н. Н., Охлопкова А. А., Васильев А. П. Совместное влияние базальтовых и углеродных волокон на свойства и структуру политетрафторэтилена // Ползуновский вестник. 2025. № 3, С. 193–198. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.03.034. EDN: <https://elibrary.ru/RONCYG>.

Original article

RESEARCH OF INFLUENCE OF BASALT-CARBON FIBERS ON PROPERTIES OF POLYTETRAFLUOROETHYLENE

Alexander A. Ushkanov¹, Nadezhda N. Lazareva², Aitalina A. Okhlopkova³,
Andrey P. Vasilev⁴

^{1, 2, 3, 4} North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, Yakutsk, Russia

¹ alexanderushkanov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5638-8399>

² lazareva-nadia92@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5090-0793>

³ okhlopkova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0691-7066>

⁴ gtvap@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7699-533X>

Abstract. The research and development of polymer composite materials based on polytetrafluoroethylene with the addition of basalt and carbon fibers (ratio 1:1) in the range from 0.1 to 5 wt.% were conducted. The results of the research showed a noticeable improvement in the characteristics of polymer composites with the combined use of fibers. In particular, it was found that the compressive strength of composite materials increases to 23% at a relative load of 10%. In addition, the wear resistance of the composites increases by 91 times, while their friction coefficient remains at a level comparable to that of the unfilled polymer. Structural studies have shown that the introduction of the filler leads to a transformation of the supramolecular structure of the polymer. The fibers are chaotic in the polymer both in the volume of the material and on the friction surface of the composites. Infrared spectroscopy made it possible to record the occurrence of tribochemical reactions on the friction surface of the samples, which emphasizes the importance of this effect for the interaction of materials during operation. An in-

© Ушканов А. А., Лазарева Н. Н., Охлопкова А. А., Васильев А. П., 2025

crease in the thermodynamic parameters of the composites is shown. Thus, the developed polymer composite materials have unique properties, which opens up new prospects in the field of using these materials in various industrial fields.

Keywords: polytetrafluoroethylene, carbon fibers, polymer composite material, rebar, binder, wear resistance, coefficient of friction, strength.

For citation: Ushkanov, A.A., Lazareva, N.N., Okhlopko, A.A. & Vasilev, A.P. (2025). Research of influence of basalt-carbon fibers on properties of polytetrafluoroethylene. Polzunovskiy vestnik, (3), 193-198. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.03.034. EDN: <https://elibrary.ru/RONCYG>.

ВВЕДЕНИЕ

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) нередко используются в строительстве и промышленности. Некоторые полимеры обладают высокой устойчивостью к низким температурам, что позволяет им эксплуатироваться даже в условиях сильных морозов. Кроме того, они устойчивы к агрессивным воздействиям окружающей среды, что делает их прекрасным вариантом для создания различных изделий: от трубопровода до деталей машин и оборудования.

Арктический регион имеет большое влияние на весь мир и бескрайний потенциал. Но из-за расположения и климатического условия в Арктике существует проблема эксплуатации технических средств. Незаменимыми материалами для применения в этих условиях являются полимерные материалы, в частности политетрафторэтилен (ПТФЭ). Однако интенсивность износа и хладотекучесть данного полимера оказываются недопустимо высокими. Для направленного улучшения свойств ПТФЭ вводят одновременно несколько наполнителей. Так, в последнее время одним из перспективных направлений становится развитие технологии, связанной с базальтовыми волокнами (БВ).

БВ получают из расплава горных магматических пород. Они обладают высокой прочностью, устойчивостью к высоким температурам и химическим агрессивным средам. Потенциал базальта сравним с другими традиционными стекло- и углеволокнами, и в некоторых случаях даже превосходит благодаря их уникальным свойствам.

Влияние базальтовых волокон на окружающую среду тоже заслуживает внимания. По сравнению с другими материалами, базальтовые волокна являются экологически чистыми и безопасными для здоровья человека. Кроме того, возможность их переработки и повторного использования делает базальтовые волокна привлекательным ресурсом с точки зрения устойчивого развития.

Исследования в области базальтовых волокон продолжаются, и их потенциал для различных отраслей промышленности и строительства все еще не полностью изучен. Вместе с тем, БВ представляют собой перспективный материал, способный значительно улучшить качество и эффективность производства различных изделий и способен конкурировать с другими видами волокон на рынке.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве полимерной матрицы при создании композитов выбран ПТФЭ ПН-90 производства АО «Гало Полимер» (Россия) ТУ 2213-022-13693708-2005, ГОСТ 10007-80.

Наполнители:

Базальтовые волокна получены из нитей ровинга ООО «ТБМ» (Россия). Длина волокон варьируется в интервале от 100 до 400 мкм, а их диаметр – 8–10 мкм. На рисунке 1 наглядно представлена схема получения волокон из нитей.

Углеродные волокна марки «Белум»

ОАО «Светлогорск Химволокно» (Беларусь). Длина филаментов 50–500 мкм, диаметр – 8–10 мкм.

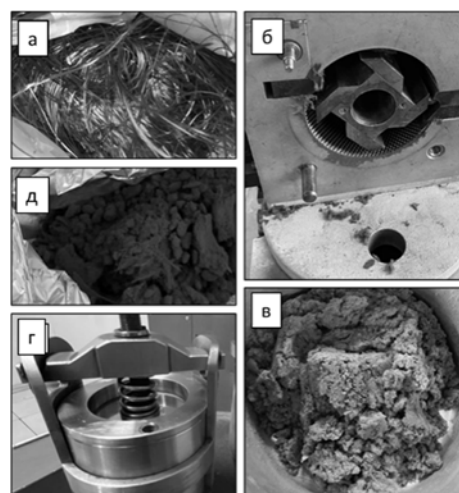


Рисунок 1 – Схема диспергирования базальтовых нитей: а) ровинг; б) режущая мельница; в) рубленые волокна; г) планетарная мельница; д) механически обработанные волокна

Figure 1 – Scheme of dispersion of basalt threads

На рисунке 2 представлена технологическая схема получения композитов, основанная на стандартной технологии переработки ПТФЭ.



Рисунок 2 – Технологическая схема получения ПКМ на основе ПТФЭ

Figure 2 – Technological scheme for obtaining PCM based on PTFE

Этап «калибровка» производили для образцов в виде цилиндров. Данный процесс позволяет повысить износостойкость материала в 1,5 раза.

Деформационно-прочностные характеристики определяли по ГОСТ 11262-2017 и ГОСТ 4651-2014. Скорость подвижного траверса составляли 1 мм/мин при сжатии, 50 мм/мин при растяжении.

Трибоиспытания осуществляли на трибометре

СОВМЕСТНОЕ ВЛИЯНИЕ БАЗАЛЬТОВЫХ И УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН НА СВОЙСТВА И СТРУКТУРУ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА

по схеме трения «палец-диск». Контртелом служил стальной диск. Время испытания образца – 3 ч., приложенная нагрузка на образец – 160 Н.

Плотность определяли по ГОСТ 15139-69 гидростатическим взвешиванием.

Структурные исследования проводили на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) «JSM-7800F» Jeol (Япония), оптическом микроскопе «Olympus» (Япония), ИК-Фурье спектрометре «FT-IR 7000» Varian (США).

Термодинамические показатели композитов находили с помощью метода дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) на «DSC 204 F1 Phoenix» Netzsch (Германия).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Сравнение микроснимков БВ, приведенных на рисунке 3, показывает, что при увеличении степени диспергирования волокон поверхность их существенно меняется, а именно появлением шероховатости (рисунк 2, б, в).

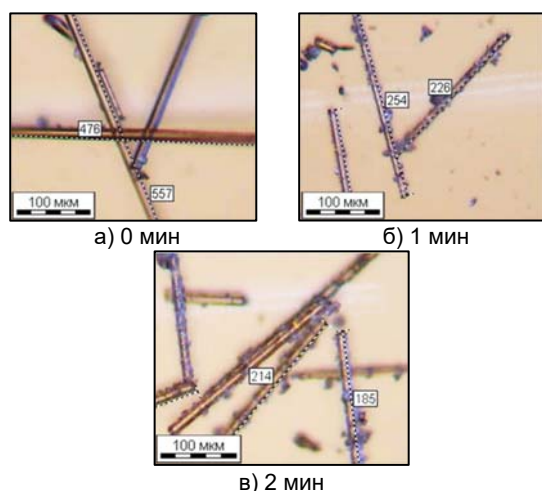


Рисунок 3 – Микроснимки базальтовых волокон в зависимости от времени механоактивации в планетарной мельнице «Активатор 2S», частота преобразователя 35,8 Гц, скорость вращения 2250 об/мин

Figure 3 – Micrographs of basalt fibers depending on the time of mechanical activation in the planetary mill «Activator 2S», converter frequency 35.8 Hz, rotation speed 2250 rpm

Таблица 1 – Результаты механических испытаний

Table 1 – Results of mechanical tests

Table 1. Results of mechanical tests							
Композит, масс. %		$\sigma_{сж}$, МПа			σ_p , МПа	ϵ , %	E, МПа
		Нагрузка, %					
		5	10	25			
ПТФЭ		8	13	21	18	394	442
УБ 1:1	0,1	9	15	23	17	325	456
	0,5	12	16	22	16	287	388
	1	13	15	20	19	327	423
	2	13	15	18	15	299	429
	5	13	16	15	16	307	536

Примечание: $\sigma_{сж}$ – прочность при сжатии, МПа; σ_p – предел прочности при растяжении, МПа; ϵ – относительное удлинение при разрыве, %; Е – модуль упругости при растяжении, МПа

Подобные изменения в структуре базальтовых волокон способствуют более крепкому сцеплению на границе раздела фаз «волокно-полимерная матрица». Соответственно, повышаются прочностные параметры, а также долговечность ПКМ на основе ПТФЭ.

В данном разделе приведены результаты исследований композитов на основе ПТФЭ, содержащих углеродные и базальтовые волокна, в соотношении 1:1.

В таблице 1 приведены результаты механических испытаний ПТФЭ и композитов на его основе.

Из таблицы 1 видно, что предел прочности при растяжении ПКМ с увеличением содержания волокон практически остается на уровне ненаполненного ПТФЭ. Невысокие характеристики предела прочности при растяжении и относительного удлинения при разрыве композитов вероятнее всего объяснить разной природой волокон. Так, в работе Кургузовой О.А. [1] было отмечено, что введение в ПТФЭ наполнителей разной природы может приводить к ухудшению данных показателей. Модуль упругости увеличивается на 17 % в отличие от чистого полимера. Из работ [2–3] известно, что увеличение Е с повышением содержания УБ в матрице обусловлено как уменьшением пространства между волокнами, так и возможным возникновением пустот, предпочтительно вблизи волокон, вследствие чего образуется пористая структура.

Результаты испытаний на сжатие показывают, что введение комбинированного наполнителя положительно влияет на повышение прочности полимерного композита.

Для более подробной оценки влияния армирующего наполнителя исследована надмолекулярная структура ПТФЭ и композитов на его основе (рис. 4).

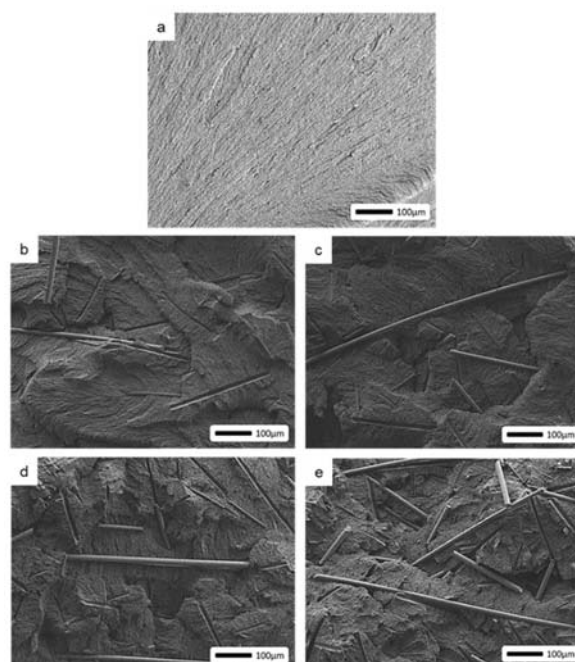


Рисунок 4 – Микрофотографии (при x150) надмолекулярной структуры ПТФЭ и композитов на его основе, содержащей УБ: а) ПТФЭ; б) 0,5 масс. %; в) 1 масс. %; г) 2 масс. %; д) 5 масс. %

Figure 4 – Micrographs (x150) of the supramolecular structure of PTFE and composites based on it, containing CB: а) PTFE; б) 0.5 wt. %; в) 1 wt. %; г) 2 wt. %; д) 5 wt. %

Микрофотографии надмолекулярной структуры ПКМ (рис. 4, б–д) показали, что матрица наполненного ПТФЭ в значительной мере отличается от структуры исходного полимера (рис. 4, а). При содержании 1 масс. % наполнителя УБ (рис. 4, б) наблюдается

структура, характеризующаяся сферической симметрией относительно центра расположения одного конца волокна в матрице. Во всех снимках (рис. 4, б–д) видно, что матрица пронизана волокнами в различных направлениях, что является основной причиной образования армированной структуры. Формирование такой структуры в ПКМ придает материалу жесткость и, как следствие, для материала характерна высокая прочность на сжатие и высокая износостойкость [4].

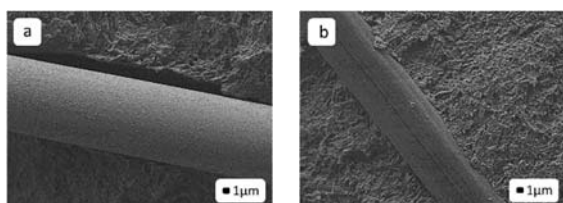


Рисунок 5 – Микрофотографии (при $\times 3000$) надмолекулярной структуры композита на основе ПТФЭ с 1 масс. % УБ в границе полимер-наполнитель: а) базальтовое волокно; б) углеродное волокно

Figure 5 – Micrographs ($\times 3000$) of the supramolecular structure of a composite based on PTFE with 1 wt.% CB in the polymer-filler interface: a) basalt fiber; b) carbon fiber

Из рисунка 5 можно рассмотреть, что на межфазной границе «базальтовое волокно – ПТФЭ» фибрилл полимерной матрицы не зафиксировано, что свидетельствует о слабом адгезионном взаимодействии между полимером и наполнителем. В случае с углеродным волокном, наоборот, можно заметить плотно обволакивающую волокно матрицу, тем самым пустоты не наблюдаются.

В таблице 2 приведены результаты трибологических испытаний ПТФЭ и ПКМ на его основе.

Таблица 2 – Исследования трибологических характеристик и плотности

Table 2 – Research of tribological characteristics and density

2. Research of technological characteristics and dens					
Композит, масс. %		Δm , г	I , мг/ч	f	ρ , г/см ³
ПТФЭ		0,154	51,39	0,23	2,15
УБ 1:1	0,1	0,153	51,05	0,17	2,19
	0,5	0,017	5,85	0,23	2,22
	1	0,008	2,72	0,25	2,18
	2	0,003	0,94	0,25	2,18

Примечание: Δm – массовый износ, г; I – скорость массового изнашивания, мг/ч; f – коэффициент трения; ρ – плотность, г/см³

Анализ полученных данных из таблицы 2 показал, что увеличение содержания УБ способствует формированию устойчивой к трению структуры (слоя) на поверхности композита. Так, скорость массового изнашивания уменьшается в 91 раз при сохранении исходного значения коэффициента трения. Монотонное повышение значения плотности ПКМ с увеличением содержания наполнителя, возможно, связано с тем, что базальтовое волокно характеризуется наиболее высокой плотностью от 2,6 до 2,8 г/см³ по сравнению с углеродным 1,45 г/см³ [5].

На рисунке 6 представлены микроснимки поверхности трения ПТФЭ и ПКМ на его основе, которые были исследованы методом оптической микроскопии.

На поверхности композитов после трения (рис. 6, б–е) обнаружены частично разрушенные волокна, но в композитах, наполненных от 2 до 5 масс. % УБ, волокна

практически остаются неповрежденными. Микроснимки поверхностей трения ПКМ на основе ПТФЭ показывают на присутствие так называемого эффекта армирования: это когда волокна, концентрируясь на поверхности трения материалов, образуют защитную структуру, предохраняющую от разрушения. В работах [6–7] отмечено, что повышение износостойкости может быть обусловлена распределением передаваемых от контртела на волокна сжимающих и сдвиговых нагрузок. Как видно из рисунка 6, е, значительного изнашивания поверхности ПКМ в процессе трения не наблюдается. Отсюда следует, что особенно высокая износостойкость характерна для ПКМ с 5 масс. % наполнителя, что подтверждается результатами трибологических испытаний (табл. 2) и формированием высокоармированной структуры (рис. 4, е).

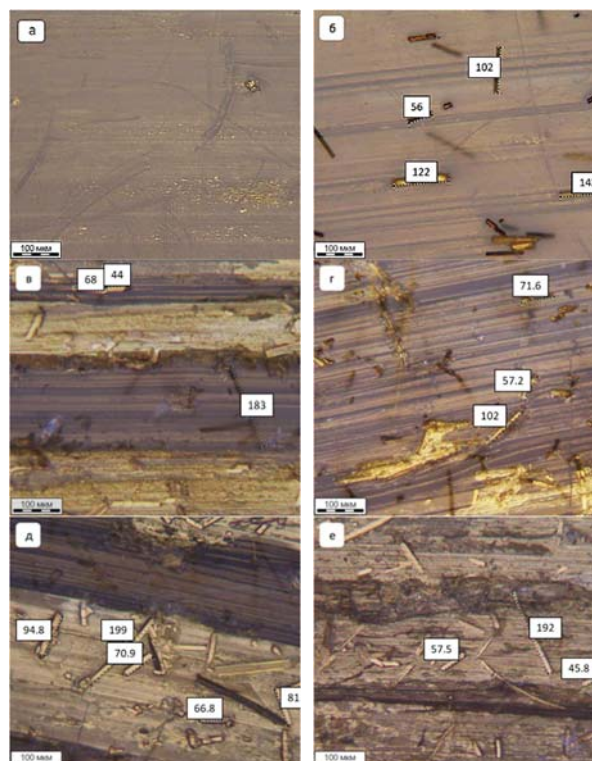


Рисунок 6 – Микроснимки поверхности трения ПТФЭ и композитов на его основе, содержащих УБ: а) ПТФЭ; б) 0,1 масс. %; в) 0,5 масс. %; г) 1 масс. %; д) 2 масс. %; е) 5 масс. %

Figure 6 – Micrographs of the friction surface of PTFE and composites based on it containing CB: a) PTFE; b) 0.1 wt. %; c) 0.5 wt. %; d) 1 wt. %; e) 2 wt. %; f) 5 wt. %

Для изучения процессов, происходящих до и после трения ПТФЭ и ПКМ на его основе, использовали метод ИК спектроскопии (рис. 7).

Из рисунка 7 обнаружено, что наиболее интенсивные полосы относятся к валентным колебаниям группы CF_2 (1201 см⁻¹ и 1147 см⁻¹). Слабовыраженные пики при 2922 см⁻¹, 2853 см⁻¹ и 1430 см⁻¹ характерны для валентных и деформационных колебаний CH_2 -группы. После трения зарегистрированы полосы при 1657 см⁻¹, которые характеризуют скелетные колебания $C=C$ связи. В работе [8] указано, что данные пики являются характеристическими пиками базальтового волокна, т.к. при производстве этих волокон используется замасливающий, в состав которого входит терпеновое масло. Наблюдаются интенсивные широкие полосы в

СОВМЕСТНОЕ ВЛИЯНИЕ БАЗАЛЬТОВЫХ И УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН НА СВОЙСТВА И СТРУКТУРУ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА

частотах от 2800 см⁻¹ до 3500 см⁻¹, которые отвечают валентным колебаниям ОН-группы. На протекание окислительных процессов зрительно указывает проявление коричневого налета на поверхности трения композитов [9].

Также исследовали термодинамические параметры методом ДСК (рис. 8).

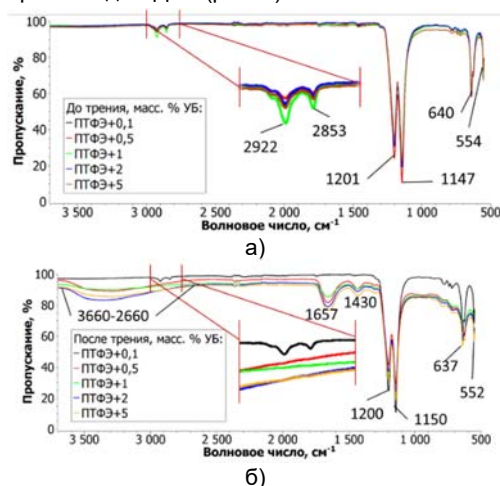


Рисунок 7 – ИК-спектры поверхностей ПТФЭ и ПКМ на его основе: (А) до и (Б) после трения

Figure 7 – IR spectra of PTFE and PCM surfaces based on it: (A) before and (B) after friction

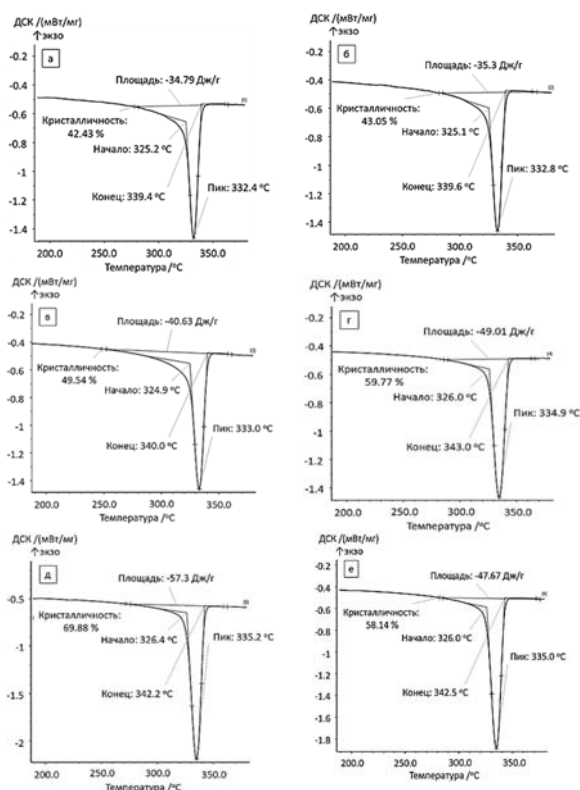


Рисунок 8 – Экспериментальные кривые ПТФЭ и его композитов, содержащие УБ: а) ПТФЭ; б) 0,1 масс. %; в) 0,5 масс. %; г) 1 масс. %; д) 2 масс. %; е) 5 масс. %

Figure 8 – Experimental curves of PTFE and its composites containing CB: a) PTFE; b) 0.1 wt. %; c) 0.5 wt. %; d) 1 wt. %; e) 2 wt. %; f) 5 wt. %

Из экспериментальных кривых ДСК (рис. 8) определяли $T_{пл}$, $\Delta H_{пл}$, $\Delta S_{пл}$, которые представлены в таблице 3.

Степень кристалличности α рассчитывали по уравнению (1):

$$\alpha = \frac{\Delta H_m}{\Delta H_m^0} \times 100\%, \quad (1)$$

где ΔH_m – экспериментально найденное значение энтальпии плавления, Дж/г;

ΔH_m^0 – табличное значение энтальпии плавления полимера со 100%-ной степенью кристалличности, которое равно 82 Дж/г [10].

Таблица 3 – Результаты исследований термодинамических параметров

Table 3 – Results of studies of the thermodynamic parameters

Композит, масс. %		$\Delta H_{\text{пл}}$, Дж/г	$T_{\text{пл}}$, К	$\Delta S_{\text{пл}}$, Дж/г	α , %
ПТФЭ		34,79	605,4	0,057	42,43
УБ 1:1	0,1	35,30	605,8	0,058	43,05
	0,5	40,63	606,0	0,067	49,54
	1	49,01	607,9	0,080	59,77
	2	57,30	608,2	0,094	69,88
	5	47,67	608,0	0,078	58,14

Примечание: $\Delta H_{пл}$ – энтальпия плавления, Дж/г; $T_{пл}$ – температура плавления, К; $\Delta S_{пл}$ – энтропия плавления, Дж/г; α – степень кристалличности, %

Из таблицы 3 зафиксировано увеличение значений энтальпии плавления и степени кристалличности композитов. В работе [11] показано, что высокую стойкость к износу имеют композиты с высокой упорядоченностью в структурной организации: чем выше $\Delta H_{пл}$, тем система становится более упорядоченной и, следовательно, больше перестроений макромолекул при расплавлении ПКМ. Увеличение энтропии при введении армирующего наполнителя в полимерную матрицу демонстрирует повышение молекулярной подвижности макромолекул ПТФЭ.

ВЫВОДЫ

Установлено, что в процессе трения волокна локализируются на поверхности трения, предохраняя материал от изнашивания и разрушения. Методами ИК-спектроскопии и дифференциальной сканирующей калориметрии зарегистрировано протекание трибохимических реакций на поверхностях трения ПКМ и увеличение их термодинамических параметров. Показана перспективность использования базальтовых и углеродных волокон в качестве комбинированного наполнителя ПТФЭ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ № FSRG-2024-0004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Кургузова О.А. Разработка износостойкого нанокомпозита на основе политетрафторэтилена с целью повышения работоспособности и долговечности металлополимерных герметизирующих свойств: дис. ... канд. тех. наук. Омск, 2014. 107 с.
- Никулин С.С., Пугачева И.Н., Черных О.Н. Композиционные материалы на основе наполненных бутадиен-стирольных каучуков, Москва. 2008. 145 с.;
- Маркова П.Н., Петрова П.Н., Федоров А.Л. Исследование трибологических свойств полимерных композитов на основе ПТФЭ в режиме сухого трения и в среде жидких смазок // Техника и технологии. 2022. № 15 (5). С. 569–582.
- Базальтофторопластовые композиты антифрикционного назначения / А.А. Охлопкова [и др.] // Вестник СВФУ. 2013. Т. 10. № 5. С. 30–36.

5. Васильев А.П. Разработка полимерных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена с углеродными волокнами и природными наполнителями: каолином и вермикулитом: дис. ... канд. тех. наук. Казань, 2021. 155 с.

6. Алексенко В.О. Износостойкие композиты на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена с армирующими волокнами для полимер-металлических трибосопряжений в машиностроении: дис. ... канд. тех. наук, Томск, 2019. 132 с.

7. Механические и триботехнические характеристики многокомпонентных твердосмазочных композитов на матрице сверхвысокомолекулярного полиэтилена / С.В. Панин [и др.] // Известия вузов: Химия и химическая технология. 2018. № 11 (61). С. 88–95.

8. Охлопкова А.А., Васильев С.В., Гоголева О.В. Исследование влияния базальтового волокна на физико-механические и триботехнические характеристики композитов на основе политетрафторэтилена // Арктика. XXI век. 2014. № 1 (2). С. 11–19.

9. Лазарева Н.Н. Разработка триботехнических материалов на основе политетрафторэтилена и механоактивированных слоистых силикатов: дис. ... канд. тех. наук, Казань, 2019. 173 с.

10. Ситникова В.Е., Пономарева А.А., Успенская М.В. Методы термического анализа. Практикум. СПб.: Университет ИТМО, 2021. 152 с.

11. Кропотин О.В., Машков Ю.К., Егорова В.А., Кургузова О.А. Разработка полимерных композитов триботехнического назначения с микроразмерными модификаторами // Омский научный вестник. 2013. № 2 (120). С. 91–94.

Информация об авторах

А. А. Ушканов – младший научный сотрудник лаборатории «Полимерные композиты для Севера» Института естественных наук ФГАОУ ВО «СВФУ им. М.К. Аммосова».

Н. Н. Лазарева – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник – зав. УНТЛ «Технологии полимерных нанокompозитов» имени доцента С.А. Слепцовой Института естественных наук ФГАОУ ВО «СВФУ им. М.К. Аммосова».

А. А. Охлопкова – доктор технических наук, профессор Института естественных наук ФГАОУ ВО «СВФУ им. М.К. Аммосова».

А. П. Васильев – кандидат технических наук, старший научный сотрудник УНТЛ «Технологии полимерных нанокompозитов» имени доцента С.А. Слепцовой Института естественных наук ФГАОУ ВО «СВФУ им. М.К. Аммосова».

REFERENCES

1. Kurguzova, O.A. (2014). Razrabotka iznosostojkogo nanokompozita na osnove politetraftoretilena s cel'yu povysheniya rabotosposobnosti i dolgovechnosti metallopolimernykh germetiziruyushchih svoystv. Extended abstract of candidate's thesis. Omsk. (In Russ.).

2. Nikulin, S.S., Pugacheva, I.N., CHernykh, O.N. Kompozitsionnye materialy na osnove napolnennykh butadienstirolnykh kauchukov, Moskva. 2008. 145.

3. Markova, M.A. Petrova, P.N. & Fedorov, A.L. (2022). Issledovanie tribologicheskikh svoystv polimernykh kompozitov na osnove PTFE v rezhime suhogo treniyai v srede zhidkikh smazok. Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. 15 (5). 569-582. (In Russ.).

4. Okhlopko, A.A., Vasilev, S.V., Petrova, P.N., Fedorov, A.L. & Tuisov, A.G. (2013). Bazal'toftoroplastovye kompozity antifrakcionnogo naznacheniya. Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta imeni M.K. Ammosova, 10 (5). 30-36. (In Russ.).

5. Vasilev, A.P. (2021). Razrabotka polimernykh kompozitsionnykh materialov na osnove politetraftoretilena s uglerodnymi voloknami i prirodnymi napolnitelyami: kaolinom i vermikulitom. Extended abstract of candidate's thesis. Kazan. (In Russ.).

6. Aleksenko, V.O. (2019). Iznosostojkie kompozity na osnove sverkhvysokomolekulyarnogo olietilena s armiruyushimi voloknami dly apolimer-metallicheskih tribosopryazhenij v mashinostroenii: Extended abstract of candidate's thesis. Tomsk. (In Russ.).

7. Panin, S.V., Aleksenko, V.O., Kornienko, L.A., Buslovich, D.G. & Valentyukovich, N.N. (2018). Mekhanicheskie i tribotekhnicheskie kharakteristiki mnogokomponentnykh tverdosmazochnykh kompozitov na matrice sverkhvysokomolekulyarnogo polietilena. Izvestiya vuzov: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya. No. 11 (61). 88-95. (In Russ.).

8. Okhlopko, A.A., Vasilev, S.V. & Gogoleva, O.V. (2014). Issledovanie vliyaniya bazal'tovogo volokna na fiziko-mekhanicheskie i tribotekhnicheskie kharakteristiki kompozitov na osnove politetraftoretilena. Arktika. XXI vek. No. 1 (2). 11-19. (In Russ.).

9. Lazareva, N.N. (2019). Razrabotka tribotekhnicheskikh materialov na osnove politetraftoretilena i mekhanooaktivirovannykh sloistykh silikatov. Extended abstract of candidate's thesis. Kazan. (In Russ.).

10. Sitnikova, V.E., Ponomareva, A.A. & Uspenskaya, M.V. (2021). Metody termicheskogo analiza. Praktikum. SPb.: Universitet ITMO. 152. (In Russ.).

11. Kropotin, O.V., Mashkov, Yu.K., Egorova, V.A. & Kurguzova, O.A. (2013). Razrabotka polimernykh kompozitov tribotekhnicheskogo naznacheniya s mikrorazmernymi modifikatorami. Omskiy nauchnyy vestnik. No. 2 (120). 91-94. (In Russ.).

Information about the authors

A.A. Ushkanov - Junior researcher of the the laboratory «Polymer composites for the North», Institute of Natural Sciences, NEFU.

N.N. Lazareva - Candidate of Technical Sciences, Leading researcher - Head of the educational, scientific and technological laboratory «Technologies of polymer nanocomposites» named after associate professor S.A. Sleptsova, Institute of Natural Sciences, NEFU.

A.A. Okhlopko - Doctor of Technical Sciences, professor of the Institute of Natural Sciences, NEFU.

A.P. Vasilev - Candidate of Technical Sciences, Senior researcher of the educational, scientific and technological laboratory «Technologies of polymer nanocomposites» named after associate professor S.A. Sleptsova, Institute of Natural Sciences, NEFU.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 19 декабря 2024; одобрена после рецензирования 24 июня 2025; принята к публикации 10 июля 2025.

The article was received by the editorial board on 19 Dec 2024; approved after editing on 24 June 2025; accepted for publication on 10 July 2025.