



Научная статья

2.6.11 – Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов (технические науки)  
УДК678.743.41

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.04.028



## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА И УГЛЕРОДНЫХ ВОЛОКОН

Александр Александрович Ушканов<sup>1</sup>, Надежда Николаевна Лазарева<sup>2</sup>,  
Айталиа Алексеевна Охлопкова<sup>3</sup>, Андрей Петрович Васильев<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3, 4</sup> Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск, Россия

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

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

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

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

**Аннотация.** В работе представлены результаты исследования полимерных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ) и модифицированных углеродных волокон марки «Белум». Установлено, что введение 1 масс. % наполнителя способствует повышению деформационно-прочностных характеристик композитов: предела прочности при растяжении на 18 %, относительного удлинения при разрыве на 2 % и модуля упругости в 1,2 раза по сравнению с ненаполненным ПТФЭ. Результаты исследования на прочность при сжатии свидетельствуют, что введение армирующего наполнителя в целом положительно влияет на повышение прочности материала: при 5 % деформации на 50 %; при 10 % деформации на 41 %; при 25 % деформации на 38 %. Трибологическими исследованиями зарегистрировано, что износостойкость композитов увеличилась в 76 раз, при сохранении коэффициента трения на уровне исходного ПТФЭ. На микрофотографиях образцов, полученных методом сканирующей электронной микроскопии, наблюдается плотно прилегающие волокна на поверхности композитов, вероятно таким образом защищают материал от изнашивания. С целью оценки взаимодействия полимерной матрицы с наполнителем проведены исследования методом дифференциально-сканирующей калориметрии. Выявлено, что чем выше энтальпия плавления, тем более упорядоченная (кристаллическая) система и тем выше стойкость к износу.

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

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ № FSRG-2023-0026.

**Для цитирования:** Ушканов А. А., Лазарева Н. Н., Охлопкова А. А., Васильев А. П. Исследование полимерных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена и углеродных волокон // Ползуновский вестник. 2023. № 4, С. 223–229. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.04.028. EDN: <https://elibrary.ru/YRCJIU>.

Original article

## RESEARCH OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS BASED ON POLYTETRAFLUOROETHYLENE AND CARBON FIBERS

Alexander A. Ushkanov<sup>1</sup>, Nadezhda N. Lazareva<sup>2</sup>, Aitalina A. Okhlopkova<sup>3</sup>,  
Andrey P. Vasilev<sup>4</sup>

© Ушканов А. А., Лазарева Н. Н., Охлопкова А. А., Васильев А. П., 2023

<sup>1, 2, 3, 4</sup> North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov, Yakutsk, Russia

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

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

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

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

**Abstract.** This paper presents the results of the research of polymer composite materials based on polytetrafluoroethylene (PTFE) and modified carbon fibers of the Belum brand. It has been established that the introduction of 1 wt. % filler contributes to an increase in the deformation-strength characteristics of composites: tensile strength by 18%, relative elongation at break by 2% and elasticity modulus by 1.2 times compared to unfilled PTFE. The results of the research on compressive strength indicate that the introduction of a reinforcing filler generally has a positive effect on increasing the strength of the material: at 5% deformation by 50%; at 10% deformation by 41%; at 25% deformation by 38%. The tribological research showed that the wear resistance of composites has increased by 76 times, while maintaining the friction coefficient at the level of the original PTFE. In the micrographs of the samples obtained by scanning electron microscopy, tightly adhering fibers are observed on the surface of the composites, probably thus protecting the material from wear. In order to evaluate the interaction of the polymer matrix with the filler, researches were carried out using the method of differential scanning calorimetry. It is revealed that the higher the melting enthalpy, the more ordered (crystalline) system and the higher the wear resistance.

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

**Acknowledgements:** This research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (grant numbers [FSRG-2023-0026]).

**For citation:** Ushkanov, A. A., Lazareva, N. N., Okhlopkova, A. A. & Vasilev, A. P. (2023). Research of polymer composite materials based on polytetrafluoroethylene and carbon fibers. *Polzunovskiy vestnik*, (4), 223-229. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.04.028. EDN: <https://elibrary.ru/YRCJIU>.

## ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное развитие наукоемких технологий предъявляет повышенные требования к уровню эксплуатационных характеристик техники различной специализации и областей применения. Основными параметрами техники, на которые обращается особое внимание при ее эксплуатации, являются надежность, безопасность, эффективность и эргономичность. Использование полимерных композиционных материалов (ПКМ) в конструкциях машин и деталей механизмов является одним из эффективных способов повышения этих параметров.

Большой интерес к ПКМ, безусловно, связан с активным освоением и развитием Арктики. Полимерные композиты, используемые в экстремально холодных условиях, за исключением главной способности сохранять свои эксплуатационные свойства при низких температурах, должны быть устойчивыми и к воздействию льда, снега и влаги. Таким образом, разработка морозостойких ПКМ является важной задачей в области современного материаловедения [1].

Политетрафторэтилен (ПТФЭ, Ф-4) является незаменимым материалом для при-

менения в качестве полимерной матрицы при создании ПКМ, эксплуатируемых в условиях Арктики. Структура полимера представляет собой спиральную углеродную цепь, плотно окруженную атомами фтора, выступающих в качестве защитного слоя. Благодаря такой структуре, ПТФЭ имеет чрезвычайно низкий коэффициент трения и химическую стойкость. Тем не менее материал имеет свои недостатки, такие как высокий износ и склонность к ползучести. Для устранения этих недостатков можно использовать армирующие модификаторы, такие как углеродные волокна.

Углеродные волокна (УВ) представляют собой прочные тонкие нити (филаменты), характеризующиеся высоким содержанием атомов углерода. Волокна имеют небольшой вес и обладают высокой прочностью на разрыв, что делает их идеальными для применения в различной промышленности, в том числе для армирования ПТФЭ, тем самым улучшая общие механические свойства ПКМ [2]. Однако производство углеродных волокон имеет высокую стоимость, что делает их дорогими для использования в массовом производстве. Во всяком случае, развитие и совершенствование технологий производства углеродных волокон продолжается, что может приве-

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА И УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

сти к снижению их стоимости и более широкому применению в будущем.

Цель работы. Разработка ПКМ с улучшенными трибологическими и механическими свойствами на основе ПТФЭ, наполненных модифицированными углеродными волокнами.

Для достижения этой цели поставлены следующие задачи:

1. Исследование влияния модифицированных углеродных волокон марки «Белум» на деформационно-прочностные характеристики ПТФЭ.

2. Изучение влияния наполнителя на трибологические свойства ПКМ в зависимости от их содержания;

3. Исследование термодинамических параметров и структуры ПКМ методами сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) и дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК).

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве полимерной матрицы при разработке композитов был выбран ПТФЭ ПН-90 производства АО «Гало Полимер» (Россия) ТУ 2213-022-13693708-2005, ГОСТ 10007-80, где в качестве армирующего наполнителя применяли углеродные волокна марки «Белум» ОАО «Светлогорск Химволокно» (Беларусь). Длина филаментов 50–500 мкм, диаметр 8–10 мкм. Для модификации поверхности УВ был применен плазмохимический метод, разработанный в ГНУ ИММС им. В.А. Белого НАН Беларуси. Из работы Васильева А.П. [2] известно, что такая химическая модификация поверхности углеволокон в среде фторорганических соединений обеспечивает прочное сцепление между армирующим наполнителем и полимерной матрицей.

Технологическая схема получения ПТФЭ и композитов на его основе приведена на рис. 1. В работе применяли свободное спекание [3–5], до которой компоненты для создания ПКМ смешивали и затем под давлением 50 МПа прессовали, чтобы получить окончательные формы образцов для исследования. При спекании не требуется использование специального оборудования или форм для создания композитов. Вместо этого отпрессованные материалы ставят в нагревательную печь в среде воздуха. Однако при свободном спекании могут возникать некоторые проблемы, такие как неоднородность материала или низкая прочность соединения, особенно для композитов со сложной рецептурой и формой образца. Этап калибровки осуществляется для образцов в виде цилиндра, что, в свою очередь, влияет на их геометрическую точность и функциональность.

Механические испытания ПКМ проводи-

лись при комнатной температуре на универсальной испытательной машине «Autograph AGS-J» фирмы Shimadzu (Япония), используя стандартные методы испытаний ГОСТ 4651-2014 и ГОСТ 11262-2017. Процент отклонения составил до  $\pm 10\%$ .

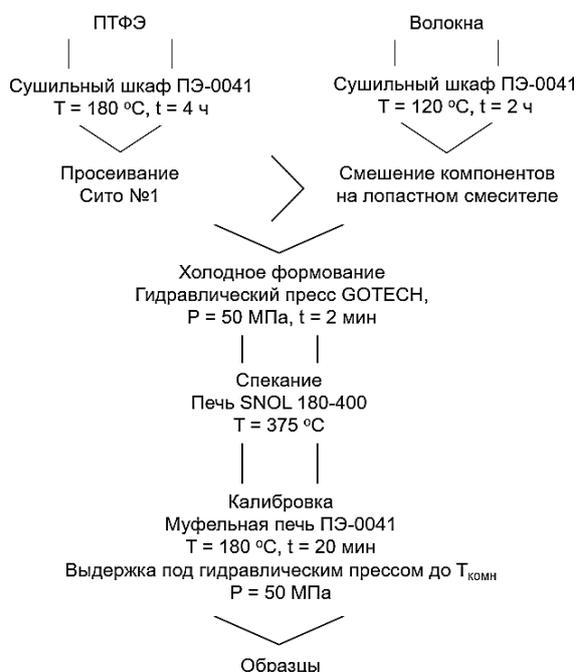


Рисунок 1 – Технологическая схема получения ПТФЭ и композитов на его основе

Figure 1 – Technological scheme for the production of PTFE and composites based on it

Трибологические параметры определяли на универсальном трибометре «СЕТР UMT-3» (США) в течение 3 ч. по схеме трения «палец–диск», где «диск» – контртело, угловая скорость вращения диска 96 об/мин, а «палец» неподвижен и находится под нагрузкой 160 Н (рис. 2).



Рисунок 2 – Схема трения «палец–диск»

Figure 2 – Friction scheme "pin-disk"

Плотность ПТФЭ и композитов на его основе устанавливали согласно ГОСТ 15139-69. В качестве рабочей жидкости использовали дистиллированную воду. Число образцов на исследование – 3.

Надмолекулярную структуру и поверхности трения композитов на основе ПТФЭ исследовали на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) «JSM-7800F» марки JEOL (Япония). Данный анализ ПКМ позволяет понять их надмолекулярную организацию и морфологию поведения материала в процессе трения.

Метод дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) «DSC 204 F1 Phoenix» NETZSCH (Германия) применяли с целью оценки физико-химического взаимодействия компонентов ПКМ (погрешность составляет не более +0,1 %). Измерения проводятся при постепенном повышении температуры с заданной скоростью, равной 20 К/мин.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Для исследования были выбраны композиты с концентрациями 1 и 5 масс. % УВ, так как в работе Марковой М.А. [и др.] [6] отмечено, что при увеличении содержания углеродных волокон до 7 и 10 масс. % происходит некоторое снижение триботехнических и физико-механических характеристик ПКМ.

В табл. 1–3 представлены результаты механических и трибологических исследований ПТФЭ и ПКМ на его основе.

Таблица 1 – Испытания на прочность при растяжении ПТФЭ и ПКМ на его основе

Table 1 – Tensile strength tests of PTFE and PCM based on it

Композит, масс. %	$\sigma_p$ , МПа	$\epsilon$ , %	E, МПа
ПТФЭ	22	390	355
УВ	1	26	401
	5	18	406

Примечание:  $\sigma_p$  – предел прочности при растяжении, МПа;  $\epsilon$  – относительное удлинение при разрыве, %. E – модуль упругости на растяжение, МПа.

Из таблицы 1 видно, что увеличение содержания УВ до 5 масс. % в ПКМ приводит к некоторому снижению предела прочности при растяжении на 18 % по сравнению с чистым ПТФЭ. Это вероятно сопоставлено с тем, что волокна не способны деформироваться в такой же степени, как полимерная матрица. Как известно из работы Кургузовой О.А. [7], повышение содержания наполнителя в композитах может привести к образованию дефектов в структуре ПКМ. А их объединение может и вовсе способствовать образованию микротрещин в структуре [8]. Для лучшего выяснения влияния волокон на ПТФЭ была более детально исследована надмолекулярная структура ПКМ (рис. 3).

Исследования надмолекулярной структуры ПКМ методом СЭМ (рис. 3) свидетельствуют, что в зависимости от содержания УВ структура композитов существенно различается. Видно, что волокна распределены в матрице хаотично, вместе с тем их повышенная поверхностная активность (благодаря модификации поверхности УВ фторорганикой) позволяет ПТФЭ при кристаллизации формировать нетипичные для данного полимера сферолитоподобные структурные элементы.

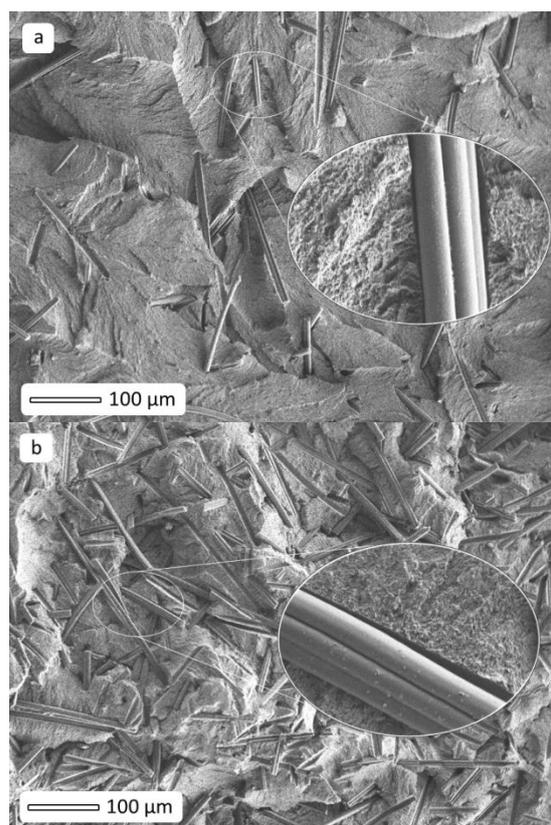


Рисунок 3 – Микрофотографии (при увел. 150 и 3000) надмолекулярной структуры ПКМ на основе ПТФЭ, содержащие УВ (масс. %): а) 1; б) 5

Figure 3 – Micrographs (at magnifications of 150 and 3000) of the supramolecular structure of PCM based on PTFE containing CF (wt.%): a) 1; b) 5

На поверхности скола с наибольшим содержанием УВ различных агломератов не наблюдается, однако структура кажется более рыхлой и пористой, что обусловлено как уменьшением пространства между волокнами, так и возможным возникновением пустот, предпочтительно вблизи волокон.

Согласно работе Калистратовой Л.Ф. и соавторов [9], увеличение содержания волокнистого наполнителя в ПТФЭ приводит к ухудшению прочностных характеристик ПКМ. Результаты проведенных исследований Кропотки-

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА И УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

на О.В. [10] также показывают, что при содержании УВ  $\leq 4$  масс. % число пор в композиционных материалах на основе ПТФЭ незначительно. Относительное удлинение увеличивается монотонно, по сравнению с исходным полимером.

Таким образом, повышение содержания УВ в ПТФЭ сопровождается снижением деформационно-прочностных характеристик композитов и одновременно к значительному увеличению прочности на сжатие (табл. 2) и износостойкости (табл. 3). Следовательно, выходит, что ПКМ становится более хрупким и склонным к образованию трещин при механическом воздействии на них. При этом в то же время повышение прочности при сжатии и уменьшение скорости массового изнашивания указывают на обратное, что полимерный композит становится более устойчивым к давлению и механическому износу.

Таблица 2 – Испытания на сжатие ПТФЭ и ПКМ на его основе

Table 2 – Compression tests of PTFE and PCM based on it

Композит, масс.%	$\sigma_{сж}$ при различных деформациях			
	5 %	10 %	25 %	
ПТФЭ	8	12	21	
УВ	1	10	14	23
	5	12	17	29

Примечание:  $\sigma_{сж}$  – прочность при сжатии, МПа.

Как видно из таблицы 2, при введении УВ в ПТФЭ прочность при сжатии при выбранных деформациях заметно увеличивается независимо от концентрации наполнителя. Это связано с тем, что углеволокна обладают очень высокой прочностью и жесткостью, что позволяет им эффективно сопротивляться сжатию. Улучшение влечет за собой повышение твердости ПКМ, вследствие увеличения волокон в объеме полимерной матрицы, то есть благодаря образованию в матрице ПТФЭ "армирующей" структуры, которая повышает сопротивление к деформации и разрушению материала при сжатии.

Таблица 3 – Исследования трибологических характеристик и плотности ПТФЭ и ПКМ на его основе

Table 3 – Studies of tribological characteristics and density of PTFE and PCM based on it

Композит, масс.%	$l$ , мг/ч	$f$	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	
ПТФЭ	51,39	0,20	2,15	
УВ	1	1,56	0,19	2,17
	5	0,67	0,19	2,12

Примечание:  $l$  – скорость массового изнашивания, мг/ч;  $f$  – коэффициент трения;  $\rho$  – плотность, г/см<sup>3</sup>

Анализ данных из таблицы 3 установил, что введение УВ благоприятно влияет на создание устойчивой к трению структуры полимера. Износостойкость композитов увеличилась в 76 раз, при сохранении исходного значения коэффициента трения ПТФЭ. Для объяснения подобного изменения трибологических свойств ПКМ исследовали структуру их поверхностей трения (рис. 4).

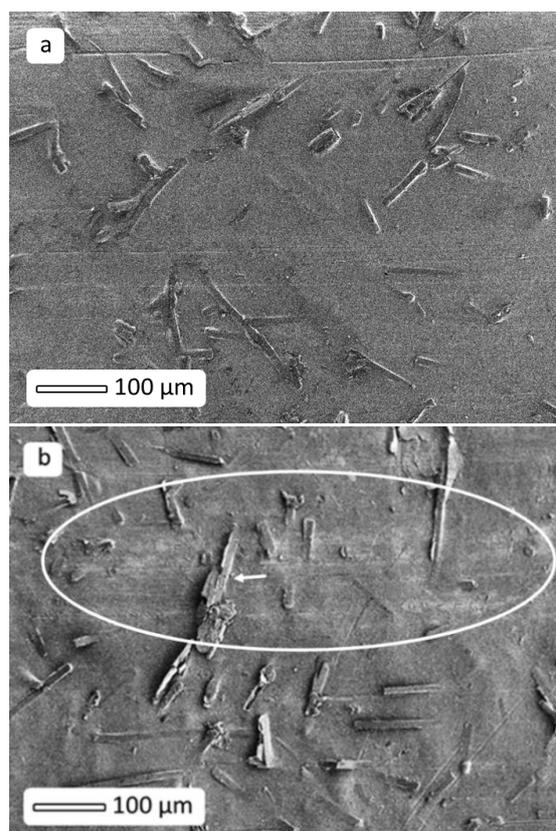


Рисунок 4 – Микрофотографии (при увел. 150) поверхностей трения ПКМ на основе ПТФЭ, содержащие (масс. %): а) 1; б) 5

Figure 4 - Micrographs (at magnification 150) of friction surfaces of PCM based on PTFE, containing (wt.%): a) 1; b) 5

Из рисунка 4 видно, что УВ расположены случайным образом (эффективное распределение нагрузки) и прилегают к поверхности достаточно плотно. В процессе трения поверхность ПКМ в обоих случаях обогащается волокнами, с увеличением концентрации УВ в композитах их содержание на поверхности трения увеличивается. Есть основание полагать, что волокна служат ориентирами для трения и предотвращают непосредственный контакт макромолекул ПТФЭ с контртелом, то есть играют роль защиты от истирания, тем самым способны обеспечить более длительный срок службы материала. В результате

механического износа вырывание волокон с поверхности трения ПКМ не обнаружено, что показывает высокую адгезию между УВ и полимерной основой композитов. Как отмечено в работе [11], при трении реализуется перенос напряжения от полимерной матрицы к волокнам. Кроме того, заметных трещин не наблюдается, что также объясняет повышение стойкости к износу ПКМ по сравнению с ПТФЭ.

Уменьшение значения плотности композита с 5 масс. % УВ по сравнению с ПТФЭ объясняется меньшей плотностью УВ.

С целью изучения адгезионного взаимодействия между компонентами в ПКМ исследовали термодинамические параметры методом ДСК. Физико-химические процессы взаимодействия наполнителя с полимером играют важную роль при формировании ПКМ. Результаты исследования представлены в табл. 4.

Таблица 4 – Исследования термодинамических параметров ПТФЭ и ПКМ на его основе

Table 4 – Research of thermodynamic parameters of PTFE and PCM based on it

Композит, масс.%	$\Delta H_{пл}$ , Дж/г	$T_{пл}$ , К	$\Delta S_{пл}$ , Дж/г	$\alpha$ , %	
ПТФЭ	38,83	597,7	0,065	47,36	
УВ	1	43,49	597,1	0,072	53,04
	5	34,18	597,6	0,057	41,68

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

Как видно из таблицы 4, происходит увеличение значений энтальпии плавления и степени кристалличности для композитов, содержащих 1 масс.% УВ. Как установлено в работе [12], наибольшую стойкость к износу имеет ПКМ с высокой упорядоченностью структуры. Другими словами, формирование более упорядоченной структуры сопровождается увеличением  $\Delta H_{пл}$  системы. Увеличение значения энтропии свидетельствует, что взаимодействие волокнистого наполнителя с молекулами полимера приводит к повышению молекулярной подвижности макромолекулы ПТФЭ.

### ВЫВОДЫ

На основании результатов исследований установлено, что введение углеродных волокон благоприятно влияет на улучшение механических и трибологических свойств ПКМ.

Выявлено, что надмолекулярная структура ПТФЭ при введении УВ сопровождается трансформацией от ламеллярной до сферолитоподобной. Установлено, что в процессе трения УВ локализируются на поверхности трения, предохраняя материал от изнашивания. Методом дифференциальной сканирующей калориметрии показано увеличение термодинамических параметров. Таким образом, комбинация этих материалов ПТФЭ и УВ (с фторорганикой) делает ПКМ привлекательным для многих отраслей промышленности, и мы можем с уверенностью ожидать, что их применение будет только расширяться.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полимерные композиционные материалы триботехнического назначения на основе политетрафторэтилена / А.А. Охлопкова [и др.] // Российский химический журнал. 2008. № 3. С. 147–151.
2. 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.
3. Болдин М.С. Физические основы технологии электроимпульсного плазменного спекания // Электронное учебно-методическое пособие. 2012. 59 с.
4. Чемисенко О.В. Структура и свойства нанокompозита на основе политетрафторэтилена, модифицированного диоксидом кремния и скрытокристаллическим графитом : дис. ... канд. тех. наук, Омск, 2018. 145 с.
5. Влияние содержания модифицированных углеродных волокон на физико-механические свойства малонаполненного ПТФЭ / Башлакова А.Л. [и др.] // Полимерные материалы и технологии. 2021. Т. 7. № 4. С. 62–67.
6. Маркова М.А., Петрова П.Н., Федоров А.Л. Исследование трибологических свойств полимерных композитов на основе ПТФЭ в режиме сухого трения и в среде жидких смазок // Журнал Сибирского федерального университета. 2022. № 15(5). С. 569–582.
7. Кургузова О.А. Разработка износостойкого нанокompозита на основе политетрафторэтилена с целью повышения работоспособности и долговечности металлополимерных герметизирующих свойств : дис. ... канд. тех. наук, Омск, 2014. 107 с.
8. Машков Ю.К., Калистратова Л.Ф., Кропотин О.В. Развитие методов формирования эффективных структурно-фазовых состояний полимерных композитов на основе ПТФЭ // Пластические массы. 2017. № 3–4. С. 12–14.
9. Калистратова Л.Ф., Зайнуллина Л.В. Сравнительный анализ толщины деформированного поверхностного слоя композитов двойных систем ПТФЭ с волокнистым и дисперсным наполнителями // Актуальные проблемы современной науки. 2019. С. 27–32.
10. Кропотин О.В. Износостойкие ПТФЭ-композиты для повышения надежности металлополимерных герметизирующих устройств изделий ма-

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА И УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

шиностроения : дис. ... докт. тех. наук. Омск, 2016. 282 с.

11. Базальтофторопластовые композиты антифрикционного назначения / А.А. Охлопкова [и др.] // Вестник СВФУ. 2013. Т. 10. № 5. С. 30–36.

12. Разработка полимерных композитов триботехнического назначения с микроразмерными модификаторами / Крпотин О.В. [и др.] // Омский научный вестник. 2013. № 2 (120). С. 91–94.

### Информация об авторах

А. А. Ушканов – аспирант 4 курса химического отделения 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, главный научный сотрудник УНТЛ «Технологии полимерных нанокompозитов» имени доцента С.А. Слепцовой 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. Ohlopkova, A.A., Petrova, P.N., Popov, S.N. & Sleptsova, S.A. (2008). Polimernye kompozitsionnye materialy tribotekhnicheskogo naznacheniya na osnove politetraftoretilena. *Rossiyskiy himicheskij zhurnal*, 147-151. (In Russ.).

2. Vasilev, A.P. (2021). Razrabotka polimernyh kompozitsionnykh materialov na osnove politetraftoretilena s uglerodnymi voloknami i prirodnyimi napolnitelyami: kaolinomivermikulitom. Extended abstract of candidate's thesis. Kazan'. (In Russ.).

3. Boldin, M.S. (2012). Fizicheskie osnovy tekhnologii elektroimpul'snogo plazmennogo spekaniya. *Elektronnoe uchebno-metodicheskoe posobie*. 59. (In Russ.).

4. Chemisenko, O.V. (2018). Razrabotka i issledovanie iznosostojkikh antifriktsionnykh polimernyh nanokompозитов na osnove politetraftoretilena. Extended abstract of candidate's thesis. Omsk. (In Russ.).

5. Bashlakova, A.L., Shelestova, V.A., Ivanov, L.F. & Grakovich, P.N. (2021). Vliyanie sodержaniya modifitsirovannykh uglerodnym volokon na fiziko-mekhanicheskie svoystva malonapolnennogo PTFE. *Polimernye materialy i tekhnologii* (4 (7)), 62-67. (In Russ.).

6. Markova, M.A. Petrova, P.N. & Fedorov, A.L. (2022). Issledovanie tribologicheskikh svoystv polimernyh

kompozitov na osnove PTFE v rezhime suhogo treniya i v srede zhidkikh smazok. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta*. (15(5)). 569-582. (In Russ.).

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

8. Mashkov, YU.K., Kalistratova, L.F. & Kropotin, O.V. (2017). Razvitiye metodov formirovaniya effektivnykh strukturno-fazovykh sostoyaniy polimernyh kompozitov na osnove PTFE. *Plasticheskie massy*. (3-4), 12-14. (In Russ.).

9. Kalistratova, L.F. & Zajnullina, L.V. (2019). Sravnitel'nyy analiz tolshchiny deformirovannogo poverhnostnogo sloya kompozitov dvoynyh sistem PTFE s voloknistymi dispersnym napolnitelyami. *Aktual'nye problemy sovremennoy nauki*. 27-32. (In Russ.).

10. Kropotin, O.V. (2016). Iznosostojkie PTFE-kompозиты dlya povysheniya nadezhnosti metallopolimernyh germetiziruyushchih ustrojstv izdelij mashinostroeniya. Extended abstract of Doctor's thesis. Omsk. (In Russ.).

11. Okhlopkova, A.A., Vasilev, S.V., Petrova, P.N., Fedorov, A.L. & Tuisov, A.G. (2013). Bazal'tofloroplastovye kompozity antifriktsionnogo naznacheniya. *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. M.K. Ammosova*, (10 (5)), 30-36. (In Russ.).

12. Kropotin, O.V., Mashkov, Yu.K., Egorova, V.A. & Kurguzova, O.A. (2013). Razrabotka polimernyh kompozitov tribotekhnicheskogo naznacheniya s mikrorazmernymi modifikatorami. *Omskiy nauchnyy vestnik*. (2 (120)). 91-94. (In Russ.).

### Information about the authors

A. A. Ushkanov - 4th year postgraduate student of the Chemical Department of the 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. Okhlopkova - Doctor of Technical Sciences, Chief researcher of the educational, scientific and technological laboratory "Technologies of polymer nanocomposites" named after associate professor S.A. Sleptsova, 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 26 марта 2023; одобрена после рецензирования 18 сентября 2023; принята к публикации 20 ноября 2023.

The article was received by the editorial board on 26 Mar 2023; approved after editing on 18 Sep 2023; accepted for publication on 20 Nov 2023.