

## Разработка композиционных материалов на основе СВМПЭ и углеродного и базальтового волокон

С. Н. Данилова<sup>✉</sup>, А. А. Охлопкова, А. В. Оконешникова

Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, г. Якутск, Российская Федерация

<sup>✉</sup>[dsn.sakhayana@mail.ru](mailto:dsn.sakhayana@mail.ru)

### Аннотация

В современном материаловедении ключевым стратегическим направлением является создание высокопрочных композиционных материалов на основе полимеров. Для решения данной задачи эффективно использование в качестве модификаторов полимерной матрицы волокнистых наполнителей, которые способствуют существенному повышению несущей способности. В работе рассматривается влияние базальтового и углеродного волокон на механические, трибологические свойства и на процессы структурообразования в сверхвысокомолекулярном полиэтилене (СВМПЭ). Концентрация волокнистых наполнителей составляла 5, 10 и 20 мас.%, они были введены в полимерную матрицу без дополнительной модификации. Установлено, что композиты с 20 мас.% углеродного волокна отличаются наибольшим повышением модуля упругости – на 66 % и снижением коэффициента трения на 65 % относительно исходного полимера. Кроме того, наблюдается снижение скорости изнашивания на 23 %. При введении углеродного и базальтового волокон в СВМПЭ зафиксировано повышение предела прочности при растяжении на 37 и 28 % соответственно. Методом ИК-спектроскопии исследованы поверхности трения композитов, установлено, что оба волокна не влияют на трибохимические процессы при изнашивании. Морфология поверхностей трения композитов свидетельствует о преимуществе углеродного волокна по сравнению с базальтовым, участия УВ в ориентационных эффектах и формирования износостойкого слоя. Разработанные материалы могут быть использованы для изготовления антифрикционных изделий, в частности для высоконагруженных опорных частей скольжения мостовых конструкций.

**Ключевые слова:** композиционный материал, сверхвысокомолекулярный полиэтилен, базальтовое волокно, углеродное волокно

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования РФ «Фундаментальные основы создания новых полимерных материалов технического и медицинского назначения с управляемыми и самоорганизующимися свойствами» (№ FSRG-2024-0004).

**Для цитирования:** Данилова С.Н., Охлопкова А.А., Оконешникова А.В. Разработка композиционных материалов на основе СВМПЭ и углеродного и базальтового волокон. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(4):661–674. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-4-661-674>

### Original article

## Development of composite materials based on UHMWPE using carbon and basalt fibers

Sakhayana N. Danilova<sup>✉</sup>, Aitalina A. Okhlopkova, Anastasia V. Okoneshnikova

Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russian Federation

<sup>✉</sup>[dsn.sakhayana@mail.ru](mailto:dsn.sakhayana@mail.ru)

### Abstract

In contemporary material's science, the development of high-strength composite materials derived from polymers represents a significant strategic focus. A promising method to enhance the mechanical properties of these materials involves the incorporation of fibrous fillers as modifiers within the polymer matrix, which markedly improves load-bearing capacity. This research investigates the effects of basalt and carbon fibers on the mechanical and tribological characteristics, and on the structural formation processes in ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE). The

fibrous fillers were introduced into the polymer matrix without prior modification at concentrations of 5, 10, and 20 weight percent. Notably, composites containing 20 weight percent carbon fiber exhibited the most pronounced enhancement in elastic modulus, achieving an impressive increase of 66 %. Additionally, a significant reduction in the coefficient of friction was observed, with a decrease of 65 % relative to the unmodified polymer. Furthermore, the wear rate was found to decrease by 23 %. The addition of both carbon and basalt fibers into UHMWPE led to substantial improvements in tensile strength, with increases of 37 % and 28 %, respectively. Analysis of the friction surfaces of the composites through infrared spectroscopy indicated that neither type of fiber influenced the tribochemical processes during wear. The morphological examination of the friction surfaces suggested that carbon fiber possesses a comparative advantage over basalt, contributing to orientation effects and the formation of a wear-resistant layer. The materials developed in this study hold potential applications in the production of antifriction components, particularly for highly loaded sliding bearing elements in bridge structures.

**Keywords:** composite material, ultra-high molecular weight polyethylene, basalt fiber, carbon fiber

**Funding.** This study was conducted within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation “Fundamental foundations for the creation of new polymeric materials for technical and medical purposes with controlled and self-organizing properties” (No. FSRG-2024-0004).

**For citation:** Danilova S.N., Okhlopko A.A., Okoneshnikova A.V. Development of composite materials based on UHMWPE using carbon and basalt fibers. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(4):661–674. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-4-661-674>

### Введение

В последнее время в различных отраслях промышленности, таких как машиностроение, судостроение, космическая и авиационная индустрия, горнодобывающая и горно-перерабатывающая промышленность, все больше используются полимерные композиционные материалы (ПКМ) [1]. Создание нового класса высокопрочных и антифрикционных ПКМ с высокими трибологическими характеристиками и высокой прочностью к перепадам давлений для высоконагруженного композиционного слоя в паре трения опорных частей деталей мостовых сооружений остается актуальной научной задачей в материаловедении.

Востребованность ПКМ в значительной степени обусловлена их прекрасными эксплуатационными свойствами, экономической рентабельностью производства и переработки, а также гибкостью процесса изготовления [2]. Конечные технологические свойства ПКМ во многом зависят от используемой полимерной матрицы и вводимых наполнителей, а также от технологических приемов модификации. Кроме того, в настоящее время существует проблема разработки композиционных материалов для узлов трения оборудования текстильной и пищевой промышленности, где необходимо постоянное применение смазочных материалов. В этих отраслях обычно используются специальные смазки, которые в основном импортируются и стоят достаточно дорого. Для решения этой проблемы целесообразно использовать полимерные матрицы, которые обладают превосходными антифрикционными свойствами.

Одним из таких материалов выступает сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ), представляющий собой новый класс высокопрочных полимеров [3]. Однако изделия из СВМПЭ подвержены трибоокислению с образованием продуктов трибораспада, которые негативно сказываются на износостойкости и механических свойствах полимера. Для устранения этой проблемы обычно применяют технологию модифицирования СВМПЭ различными наполнителями. Многие дисперсные наполнители, такие как сажа, разного рода оксиды ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ), гидроксипатит и т. д., были исследованы в качестве наполнителей для СВМПЭ [4–6]. Использование дисперсных наполнителей не всегда приводит к улучшению свойств ПКМ, так как сложно обеспечить хорошую совместимость компонентов смеси композиции. Это обусловлено с различиями в их химической структуре и поверхностной энергии дисперсных наполнителей по отношению к полимеру. В связи с этим большой интерес представляют волокнистые наполнители. Они эффективно увеличивают прочность полимерной матрицы за счет эффекта армирования, а износостойкость – за счет участия волокон в ориентационных процессах при трении [7].

Одним из перспективных синтетических волокнистых наполнителей выступают углеродные волокна (УВ), несмотря на их высокую стоимость. Эти волокна характеризуются высокими значениями удельной прочности, модуля упругости и сопротивлением к ползучести. Причем УВ, модифицированные фторорганическими соединениями плазмохимическим методом, проявляют

хорошие антифрикционные свойства [8, 9]. В свою очередь самым распространенным и дешевым природным волокном является базальтовое волокно (БВ), изготавливаемое из горной породы базальта. При массовом производстве базальтовые волокна обходятся значительно дешевле стеклянных и углеродных, поскольку сырье доступнее, а технологический цикл изготовления проще [10]. Базальтовые волокна отличаются высокой термостойкостью, характеризуются широким температурным интервалом эксплуатации и стойкостью к агрессивным химическим средам, а также повышенным значением модуля упругости [11]. Разрабатываемые полимерные композиты предназначены для эксплуатации в жестких условиях, в частности, для применения в линейно-подвижных опорных частях мостовых конструкций. Для этих деталей требуется высокая нагрузочная способность, которая достигается только при высоких концентрациях волокон в матрице.

Целью исследования является оценка влияния углеродного и базальтового волокон на прочностные и трибологические параметры композиционных материалов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена.

### **Материалы и методы исследования**

Полимерной матрицей для изготовления композитов является сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) марки GUR-4022 (Celanese, Китай) с молекулярной массой 5,3 млн г/моль. В качестве волокнистых наполнителей использовали: базальтовое волокно (БВ) ООО «Технология базальтовых материалов» (Россия) со средним диаметром волокон 13–20 мкм, которое было получено измельчением на мельнице Pulverisette-15 (Fritsch, Германия) базальтового роллинга с последующим просеиванием через сито на 250 мкм; углеродное волокно (УВ) марки «Белум» ОАО «Химволокно» (Беларусь) с диаметром 4–10 мкм и длиной 50–500 мкм, модифицированное плазмохимическим методом в среде фторорганических соединений. Волокнистые наполнители вводили в СВМПЭ в концентрации 5, 10 и 20 мас.%. Композиты получали методом горячего прессования.

Механические свойства композитов определяли на машине Autograph AGS-J (Shimadzu, Япония) согласно ГОСТ 11262-2017, ГОСТ 4651-2014 и ГОСТ 9550-81. Трибологические свойства ПКМ исследовали на приборе UMT-3 (CETR, США) по схеме трения «палец-диск» при удель-

ной нагрузке 1,9 МПа и скорости скольжения 0,5 м/с, время испытания составило 3 ч. Плотность ПКМ определяли методом гидростатического взвешивания по ГОСТ 15139-69. Структурные исследования проводили на ИК-спектрометре Varian 7000 FT-IR (Varian, США) и на сканирующем электронном микроскопе JSM-7800F (Jeol, Япония). Термодинамические свойства исследовали на дифференциальном сканирующем калориметре (ДСК) «DSC 204 F1 Phoenix» (NETZSCH, Германия).

### **Результаты и обсуждение**

Введение волокнистых наполнителей позволяет армировать полимерную матрицу, что, в свою очередь, приводит к улучшению механических свойств материала, особенно его прочности. Эффективность армирования волокнами зависит от геометрии волокон (соотношения длины к диаметру) и природы взаимодействия с полимерной матрицей. Предполагается, что высокие прочностные свойства ПКМ будут наблюдаться в системах с однонаправленно ориентированными волокнами и наличием межфазного взаимодействия с полимером [12]. С целью определения влияния УВ и БВ (при повышенных концентрациях) на физико-механические свойства СВМПЭ провели исследования образцов.

Согласно результатам исследований, представленным на рис. 1, добавление УВ приводит к увеличению предела прочности при растяжении ПКМ на 37 % и модуля упругости на 66 % по сравнению с исходным СВМПЭ. При этом стоит отметить, что с повышением концентрации углеродных волокон до 20 мас.% наблюдается значительное снижение относительного удлинения при растяжении – на 91 %. В то же время, при содержании УВ в 5 и 10 мас.% показатели относительного удлинения ПКМ остаются такими же, как у исходного СВМПЭ. Из работы [13] известно, что углеродные волокна не влияют на пластичность композитов на основе СВМПЭ. В случае высоких концентраций УВ разрушение может зарождаться не только в межфазной зоне «волокно-полимер», но и в объеме полимера. Поэтому прочность при растяжении и модуль упругости композитов с 10 и 20 мас.% УВ выше значений СВМПЭ, а относительное удлинение при разрыве снижается.

Композитные материалы, модифицированные добавлением БВ, демонстрируют впечатляющие

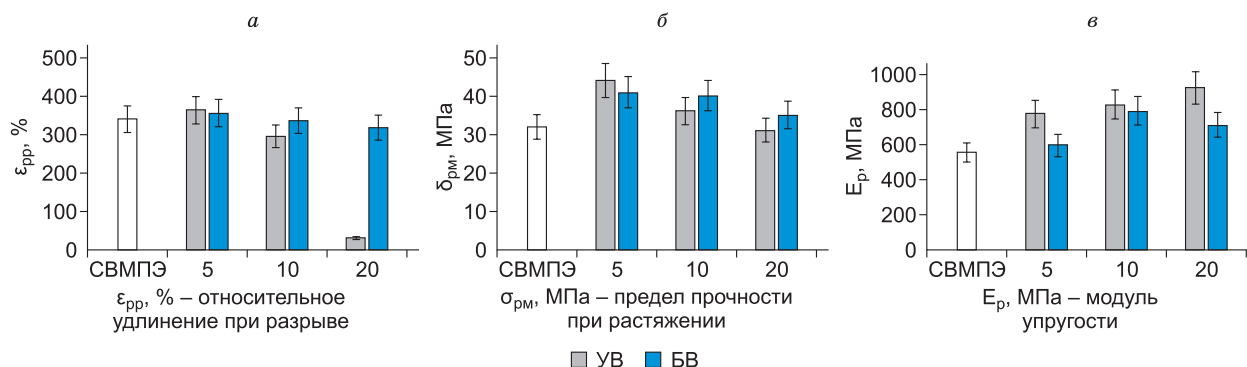


Рис. 1. Результаты исследований физико-механических свойств ПКМ

Fig. 1. Results of studies on the mechanical properties of the PCM

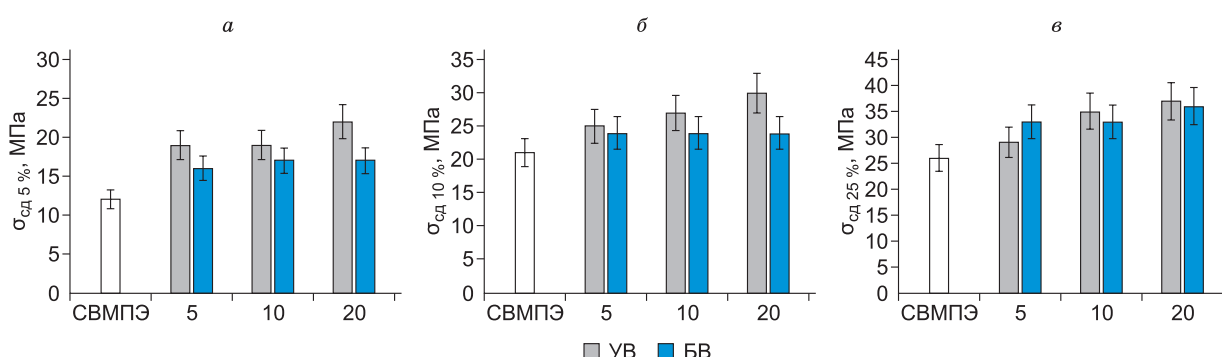


Рис. 2. Данные прочности при сжатии при установленной деформации:

а – 5 %; б – 10 %; в – 25 %

Fig. 2. Compressive strength at relative deformation at:

(а) – 5 %; (б) – 10 %; (в) – 25 %

результаты, так их прочность при растяжении увеличивается на 28 %, а модуль упругости на 43 %. Кроме того, во всем диапазоне концентраций наполнения относительное удлинение при разрыве композиций остается неизменным. Такое существенное увеличение прочности и сохранение эластичности композитов с БВ могут быть связаны с наличием замасливателя на основе силана, которым покрыта поверхность базальтового волокна. Этот модификатор-замасливатель, вероятно, влияет на уровень взаимодействия между волокном и полимером, что приводит к улучшению свойств композитного материала [11]. Тем не менее, по показателям прочности при растяжении и модуля упругости композиты с БВ уступают образцам, наполненным УВ. Это свидетельствует о том, что при измельчении БВ сложно варьировать его однородность, а также невозможно контролировать изменение состояния поверхности и формирование внутренних дефектов в самом волокне [12]. Неоднородность длин волокон приво-

дит к неравномерному армированию полимерной матрицы, поэтому БВ уступает более однородно синтезированному УВ.

Результаты исследований прочности при сжатии при установленной деформации 5, 10 и 25 % ПКМ приведены на рис. 2.

Результаты исследования показывают, что с увеличением содержания волокон в составе ПКМ увеличивается его прочность сжатия: при установленной деформации в 5 % ПКМ с УВ – на 83 %, а при установленных деформациях в 10 и 25 % – на 42 %. Введение базальтовых волокон также сопровождается повышением прочности сжатия ПКМ: при установленной деформации в 5, 10 и 25 % – на 41, 14 и 38 % соответственно. Эти данные свидетельствуют о том, что использование волокон позволяет существенно улучшить нагрузочную способность композитных материалов. Однако композиты, наполненные УВ, демонстрируют более значительное увеличение прочности при сжатии по сравнению с ПКМ, содер-



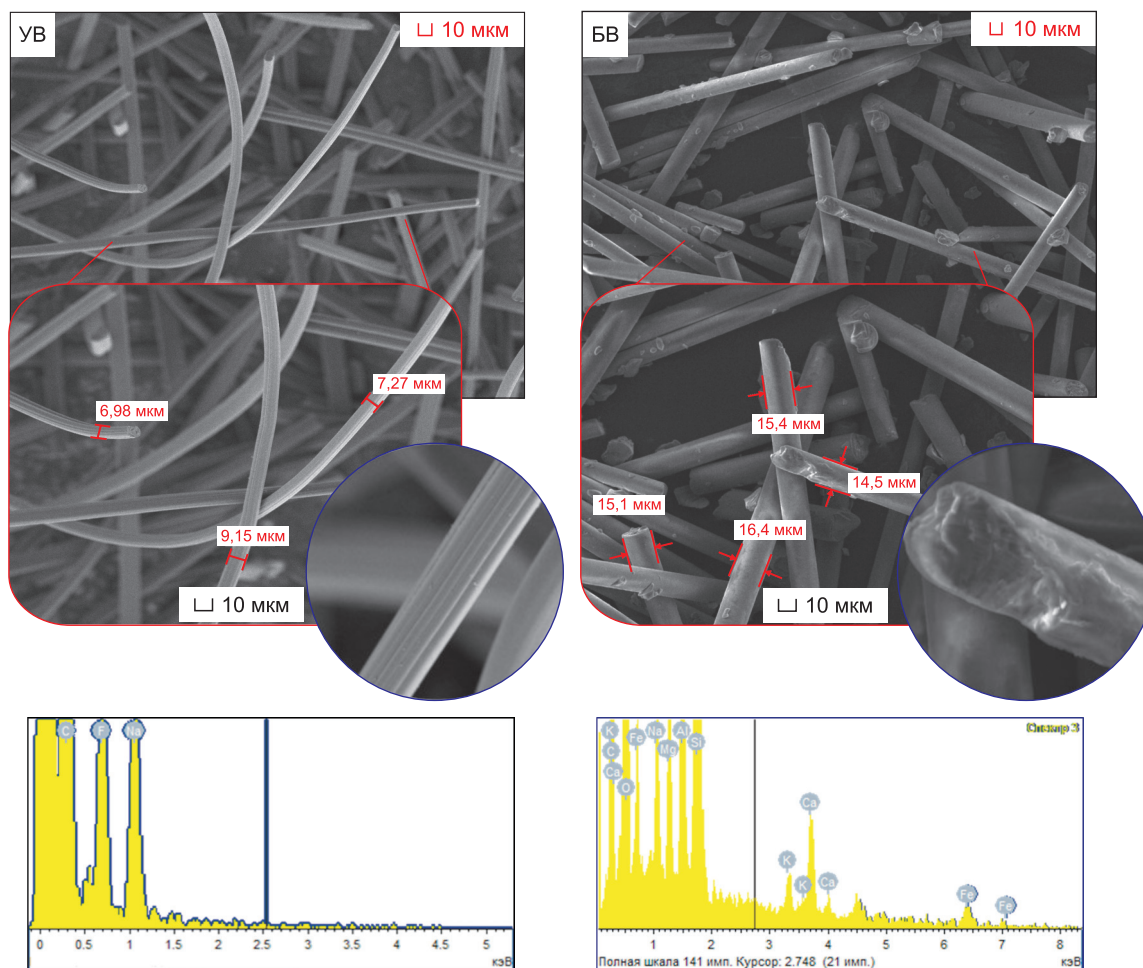


Рис. 3. Микрофотографии волокон и их элементный состав

Fig. 3. Micrographs of fibers and their elemental composition

жащими БВ. В последних неоднородность по размерам и наличие замасливателя приводят к преждевременному отслоению в области интерфейса при сжатии. В композитах с УВ характер разрушения имеет другой вид, так из-за наличия фторполимерного покрытия на поверхности УВ облегчаются процессы релаксации и ориентации волокон в объеме полимера при наложении внешней нагрузки, т. е. идет перераспределение внутреннего микронапряжения и внешней силы сжатия.

Для подтверждения вышеизложенного исследовали структуру исходных волокон, использованных в данной работе (рис. 3). Из микрофотографий видно, что УВ характеризуется более однородным распределением по длине волокон, с диаметром волокон от 6 до 9 мкм. Волокна УВ состоят из продольных лентообразных полос, ориентированных вдоль оси волокна, благодаря

такой структуре увеличивается его удельная поверхность и обеспечивается физическая адгезия с полимерной матрицей. Элементный анализ подтверждает наличие фтора вследствие плазмохимической обработки фторорганическими соединениями УВ

Базальтовые волокна характеризуются неоднородным распределением по длине, т. е. полидисперсны, при этом диаметр волокон больше по сравнению с УВ и варьируется в пределах 14–16 мкм. При большом увеличении видно, что поверхность базальтовых волокон неоднородная, имеются «наплывы» из эпоксидного модификатора, что подтверждено элементным анализом. Остальные зафиксированные элементы соответствуют составу базальта:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ .

Для оценки характера влияния волокон на СВМПЭ проведены исследования термодинами-

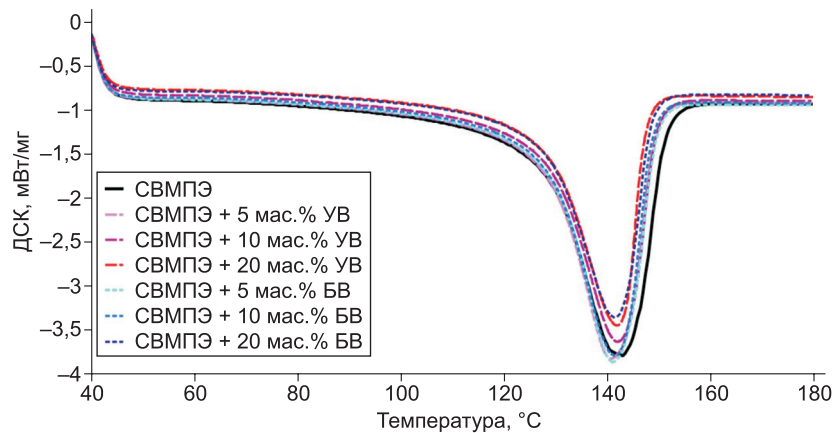


Рис. 4. ДСК-кривая композитов в зависимости от используемого волокна  
Fig. 4. DSC curve of composites depending on the fiber used

ческих параметров методом ДСК. В табл. 1 и на рис. 4 приведены термодинамические параметры композитов в зависимости от используемого волокна.

Из рис. 4 видно, что ДСК-кривая композитов и СВМПЭ характеризуется наличием эндотермических пиков плавления при температуре около 140–142 °С. Введение 20 мас.% обоих волокон сопровождается сужением площади и снижением интенсивности эндотермических пиков плавления. ДСК-кривая композитов с 5 мас.% волокна отличается некоторым смещением пика в сторону меньших температур.

Известно [14], что энтальпию плавления можно определить из площади эндотермического пика на кривой ДСК. Выявлено, что добавление УВ в СВМПЭ приводит к снижению энтальпии плавления на 25 % и степени кристалличности на 26 %, а с БВ – на 23 %. Помимо этого, было

отмечено незначительное уменьшение температуры пика плавления – примерно на 2 °С по сравнению с исходным СВМПЭ. Отклонение термодинамических параметров при введении волокон объясняется изменением кристаллической структуры полимера, т. е. в этом случае наблюдаются деформирование аморфных участков (увеличение дефектности) и изменение размеров ламеллярных кристаллитов за счет снижения сегментальной подвижности макромолекул СВМПЭ [15]. Кроме того, снижение показателей степени кристалличности и энтальпии плавления обусловлено большей плотностью волокон и высоким их содержанием в полимерной матрице. В [16] установлено, что при высоких концентрациях наполнителей затормаживаются процессы нуклеации при формировании структуры ПКМ, вследствие их подверженности агломерации при превышении оптимума наполнения.

Таблица 1  
Термодинамические данные СВМПЭ и ПКМ

Table 1

Thermodynamic data of the UHMWPE and PCM

Композит	Энтальпия плавления, $H_{пл}$ , Дж/г	Температура плавления, $T_{пл}$ , °C	Степень кристалличности, $\alpha$ , %
Исходный СВМПЭ	171,1	142,6	58,8
+5 мас.% УВ	158,8	140,6	54,2
+10 мас.% УВ	147,9	141,3	50,5
+25 мас.% УВ	127,3	140,6	43,4
+5 мас.% БВ	154,6	140,9	52,8
+10 мас.% БВ	150,4	140,6	51,2
+25 мас.% БВ	131,0	140,6	44,7

## Трибологические параметры СВМПЭ и ПКМ

Table 2

## Tribological parameters of the UHMWPE and PCM

Композит	Плотность, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Коэффициент трения	Скорость изнашивания, $K$ , $\cdot 10^{-6}$ мм <sup>3</sup> /(Н · м)
Исходный СВМПЭ	0,93	0,38	0,57
+5 мас.% УВ	0,95	0,38	0,55
+10 мас.% УВ	0,97	0,13	0,59
+25 мас.% УВ	0,99	0,13	0,44
+5 мас.% БВ	1,00	0,30	0,70
+10 мас.% БВ	1,00	0,32	0,79
+25 мас.% БВ	1,07	0,34	1,73

Исследование трибологических аспектов повышения износостойкости волокно-армированных композитов является необходимым условием для направленного повышения надежности конструкций [17]. При этом известно [18], что вводимые волокна выполняют функцию обеспечения ориентационных эффектов при структурировании поверхностных слоев и берут на себя основную нагрузку при трении, тем самым предотвращая преждевременный износ полимерной части. Главная проблема при разработке композитов с высоким содержанием волокнистых наполнителей заключается в удалении из трибоконтактной зоны частиц износа, которые впоследствии могут функционировать как абразивные элементы и привести к разрушению ПКМ, а также прилегающих рабочих поверхностей.

В работе проведены исследования трибологических свойств ПКМ, результаты которых представлены в табл. 2. Из трибологических результатов выявлено, что ПКМ, наполненные 20 мас.% УВ, отличаются снижением коэффициента трения на 65 % и скорости изнашивания на 23 % по сравнению с исходным полимером. Это происходит из-за присутствия фторорганических соединений на поверхности УВ. Эти соединения способствуют легкому скольжению при трении, действуя как смазка. Преимущество использования УВ для изготовления триботехнических материалов обусловлено его высокой прочностью, минимальным абразивным воздействием на стальное контртело. При трении основная прилагаемая нагрузка передается на частицы УВ в поверхностном слое между контактирующими телами, при этом они участвуют в ориентационных эффектах, защищают полимер от истирания [19].

При введении БВ отмечается увеличение скорости изнашивания в 3 раза по сравнению с СВМПЭ. Наблюдаемое явление указывает на легкость вырывания БВ из поверхностного слоя композита при изнашивании с дальнейшим удалением из зоны трения. В работе [20] предполагается, что в волокно-наполненных композитах более выражены неоднородность и нелинейные эффекты при деформации. Кроме того, появляются зоны диссипации на концах волокон в ПКМ, что дополнительно вызывает микронапряжения в системе. При высоких концентрациях волокон увеличиваются дефектность и неоднородность композиционной системы, т. е. увеличивается число центров микронапряжений. В данном случае разрушение происходит по местам интерфейса (межфазной зоны) волокна с полимерной фазой [21], поэтому часть волокон легко вырывается из матрицы. Однако, наблюдается некоторое уменьшение коэффициента трения, так композит с содержанием БВ 5 мас.% характеризуется снижением коэффициента трения на 21 %. Данный факт указывает на то, что вырванные базальтовые волокна не участвуют в качестве дополнительных абразивных частиц. Вместе с тем, пластическая деформация СВМПЭ ограничивается с увеличением количества БВ в сдвиговом слое, что приводит к снижению адгезии между СВМПЭ и стальным контртелом. При этом часть частиц БВ воспринимают на себя прилагаемую нагрузку, что дополнительно снижает коэффициент трения [22].

Из табл. 2 видно увеличение плотности композитов при введении обоих волокон. Наибольшее увеличение плотности наблюдается при введении базальтовых волокон – 15 % относительно

но исходного СВМПЭ. Это обусловлено высокой плотностью самого базальтового волокна, равной  $2,7 \text{ г/см}^3$ , а плотность углеродного волокна –  $1,4 \text{ г/см}^3$  [23].

С целью определения поведения волокон при трении ПКМ исследовали поверхности трения с использованием СЭМ (рис. 5). Поверхности трения исходного СВМПЭ характеризуются наличием бороздок, такая поверхность обычно образуется в результате пластической деформации и микрорезания стальным контртелом более мягкого полимера. Бороздки расположены вблизи друг друга, при этом они характеризуются небольшой глубиной. Композиты с УВ отличаются отсутствием выраженных бороздок. При содержании УВ 5 мас.% зафиксировано наличие перпендикулярно расположенных частиц. Поверхность трения композита с 10 мас.% УВ становится более рыхлой, также зафиксированы отдельные волокна, частично изношенные без удаления с поверхности ПКМ, что указывает на хорошую адгезию с матрицей. При увеличении содержания до 20 мас.% УВ наблюдается рост количества волокон на поверхности трения с хаотичным распределением. Видно, что часть волокон измельчается при трении и участвует в ориентационных процессах по направлению трения [18]. Примечательно, что вырывание волокон не зафиксировано и на поверхности трения ПКМ отсутствуют трещины.

У композитов, содержащих базальтовые волокна, глубина и ширина бороздок увеличиваются. При содержании БВ 5 мас.% наблюдаются отдельные волокна, часть которых отслоилась от полимерной матрицы, также зафиксировано подплавление и наматывание полимера на поверхность волокон. Кроме того, характер выступов и бороздок дискретный, на поверхности их наблюдается наличие мелкодисперсных частиц и участков отрыва волокон. В случае композитов, наполненных 10 мас.% БВ, наблюдается формирование ориентированных вторичных структур, а также истертых частиц волокон и их агломерации на поверхности трения. При содержании БВ 20 мас.% поверхность трения становится более гладкой, наблюдается формирование зон подплавления, что указывает на адгезионный характер трения. Отмечается образование тонких вторичных структур и незначительных участков скопления волокон, по краям которых формируются трещины.

На основании сравнительного анализа поверхностей трения композитов в зависимости от используемого волокна можно сделать вывод, что ПКМ с УВ характеризуется как более гладкий с отсутствием расслоения волокон от полимерной матрицы.

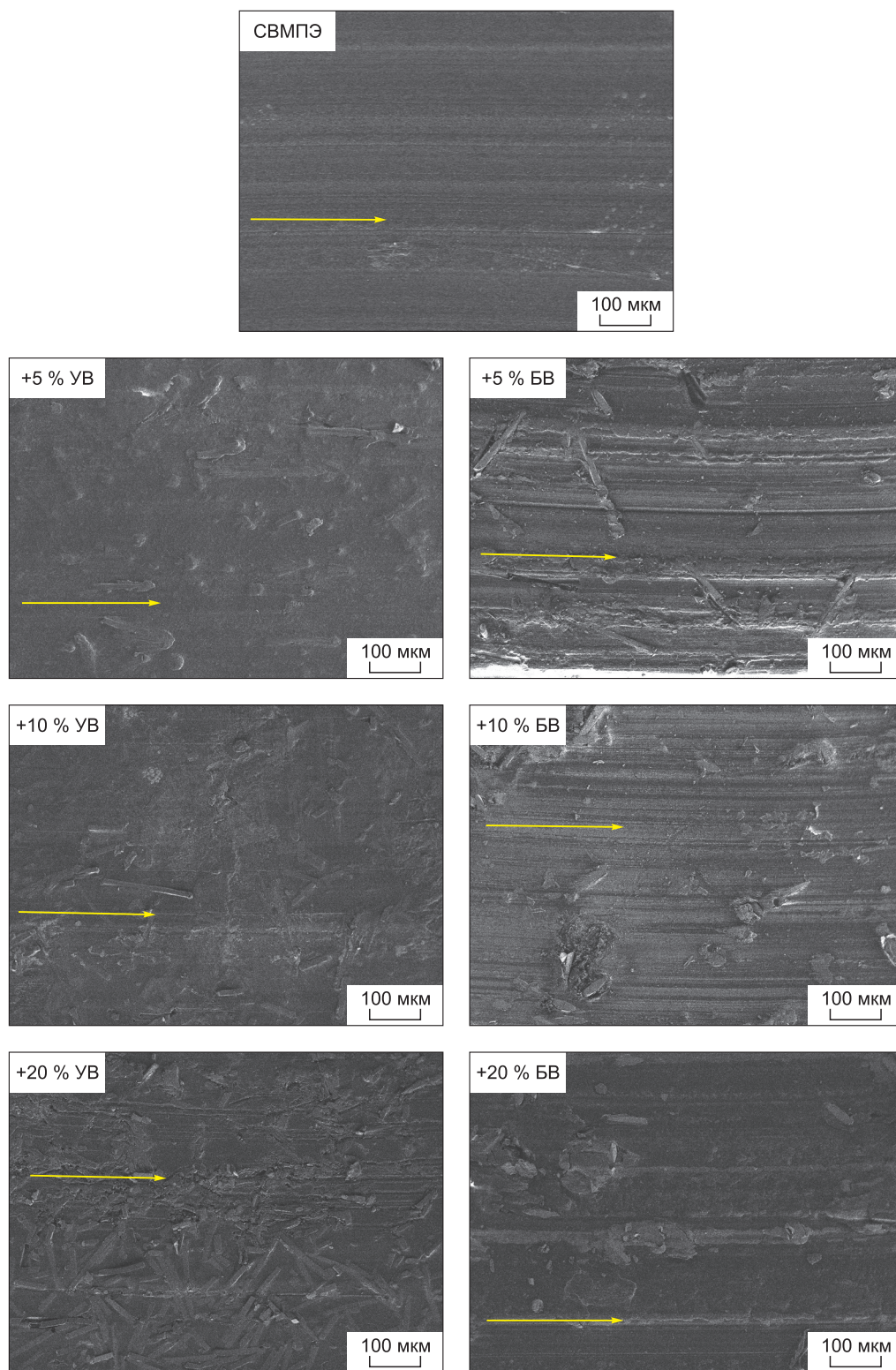
На рис. 6 представлены ИК-спектры поверхностей образцов до и после трения. Во всех ИК-спектрах отмечаются полосы поглощения, которые соответствуют СВМПЭ. Например, пики при  $2916$ ,  $2847$  и  $1473 \text{ см}^{-1}$  связаны с валентными и деформационными колебаниями алкильных радикалов, а пик при  $718 \text{ см}^{-1}$  – с колебанием макромолекул.

ИК-спектры поверхностей образцов после трения отличаются наличием широкой полосы поглощения в области  $3598\text{--}3144 \text{ см}^{-1}$ , относящейся к колебаниям ассоциированных гидроксигрупп, и при  $1779\text{--}1521 \text{ см}^{-1}$ , обусловленной наложением колебаний двух функциональных групп: оксо- и карбоксильной. Это указывает на протекание трибоокислительных процессов при изнашивании, инициированных условиями трения на воздухе, и высокие температуры в зоне трения с образованием так называемых вторичных структур [24].

Установлено, что наблюдаемый в спектре новый пик поглощения ПКМ с БВ имеет широкий диапазон в области  $1245\text{--}819 \text{ см}^{-1}$ . Этот диапазон характерен для соединений кремния в БВ и указывает на валентные колебания связей кремния с кислородом и с углеродом [25]. С увеличением содержания БВ отмечается уширение этой полосы, при этом волокна не влияют на протекание механохимических трибоокислительных процессов.

В случае ИК-спектров композиций с 5 мас.% УВ наблюдается наличие двух пиков при  $1228$  и  $1155 \text{ см}^{-1}$ , относящихся к фторорганике на поверхности УВ, к колебаниям связи C–F [26]. У ПКМ с 10 и 20 мас.% УВ зафиксировано увеличение интенсивностей поглощения, поэтому наблюдается уширение и сливание пиков при  $1228$  и  $1155 \text{ см}^{-1}$ . При этом отслеживаемые незначительные пики в области  $2147$  и  $2037 \text{ см}^{-1}$  не распознаются [25]. Исходя из ИК-спектров композитов, сложно утверждать о влиянии УВ на процессы трибоокисления. Таким образом, УВ и БВ при высоких концентрациях не интенсифицируют трибоокислительные процессы ПКМ. Зафиксированные новые пики на ИК-спектрах относятся к химическим превращениям самих волокон.





**Рис. 5.** Микрофотографии поверхностей трения СВМПЭ и ПКМ в зависимости от используемого волокна (при увеличении  $\times 150$ )

**Fig. 5.** Micrographs of friction surfaces of the UHMWPE and PCM depending on the fiber used ( $\times 150$ )

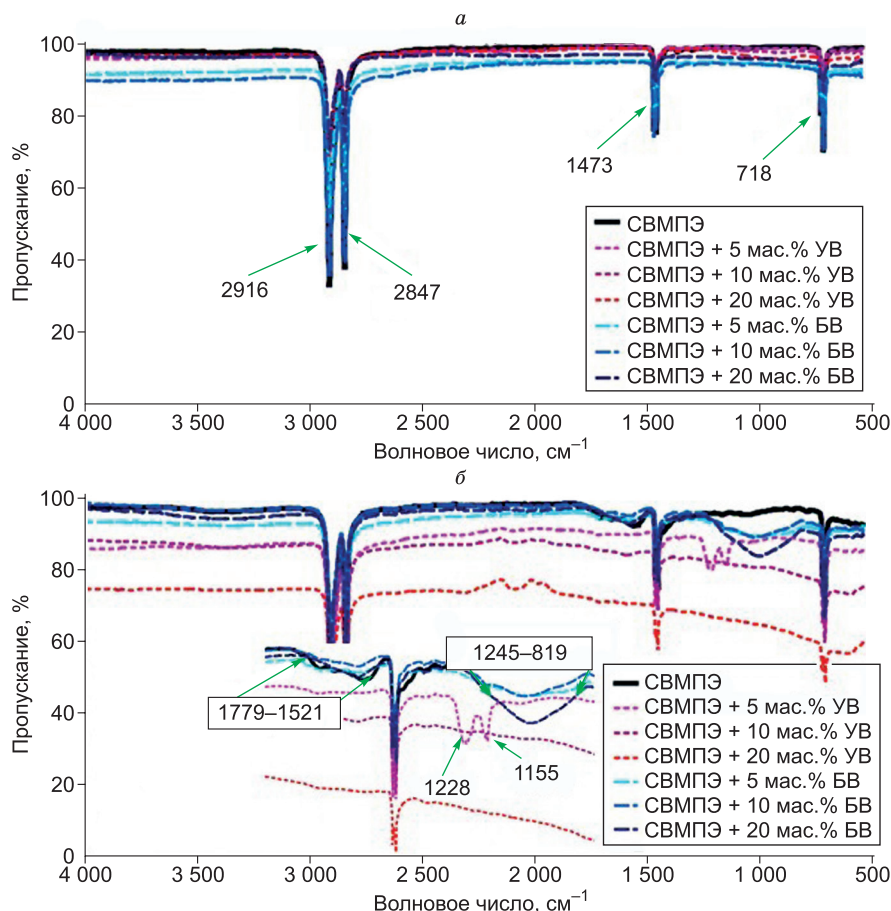


Рис. 6. ИК-спектры композитов до (а) и после трения (б)

Fig. 6. IR spectra of the composites before (a) and after friction (b)

### Заключение

Проведенные исследования показали, что добавление углеродных и базальтовых волокон в СВМПЭ приводит к увеличению прочности, износостойкости и жесткости композитных материалов. Установлено, что композиты с УВ характеризуются повышением износостойкости, так введение 20 мас.% способствует снижению скорости изнашивания на 23 %. В случае с базальтовым волокном отмечается увеличение скорости изнашивания в 3 раза. При этом наблюдается снижение коэффициента трения на 65 и 21 % для композитов с углеродными и базальтовыми волокнами соответственно. Морфология поверхности трения ПКМ свидетельствует о том, что волокна агломерируются и локализуются на поверхности трения, уменьшая при этом площадь фактического контакта полимера с поверхностью стального контртела. За счет участия волокон в ориентационных эффектах наблюдается сниже-

ние коэффициента трения. При этом поверхность трения ПКМ с УВ характеризуется как менее шероховатая за счет лучшего адгезионного взаимодействия модифицированных фторорганическими соединениями волокон с полимерной матрицей. Методом ДСК установлено, что введение волокон сопровождается снижением энтальпии плавления на 25 % и степени кристалличности на 23 и 26 % относительно полимера, что обусловлено изменением кристаллической структуры СВМПЭ при введении высоких концентраций наполнителей. Это приводит к ограничению сегментальной подвижности макромолекул полимера вследствие взаимодействия с поверхностью волокон.

Разработанные материалы с добавлением углеродных волокон отличаются высокой износостойкостью, повышенной прочностью при сжатии и низким коэффициентом трения. Это позволит использовать композиционные материалы для создания антифрикционных изделий, для экс-



плутации при больших нагрузках, в том числе для применения в линейно-подвижных опорных частях мостовых конструкций.

### Список литературы / References

1. Артеменко С.Е., Кадыкова Ю.А. Полимерные композиционные материалы на основе углеродных, базальтовых и стеклянных волокон. *Химические волокна*. 2008;(1):30–32.
2. Artemenko S.E., Kadykova Yu.A. Polymer composite materials based on carbon, basalt, and glass fibres. *Fibre Chemistry*. 2008;40(1):37–39.
3. Чуков Д.И., Жеребцов Д.Д., Нематуллоев С.Г. Исследование структуры и свойств самоармированных композиционных материалов на основе волокон из сверхвысокомолекулярного полиэтилена. *Фундаментальные исследования*. 2017;(11-1):145–150.
4. Chukov D.I., Zherebtsov D.D., Nematulloev S.G. Investigation of structure and properties of self-reinforced composite materials based on ultra-high molecular weight polyethylene fibers. *Basic Research*. 2017;(11-1):145–150. (In Russ.)
5. Селютин Г.Е., Гаврилов Ю.Ю., Воскресенская Е.Н. и др. Композиционные материалы на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена: свойства, перспективы использования. *Химия в интересах устойчивого развития*. 2010;18(3):375–388.
6. Selyutin G.E., Gavrilov Y.Y., Voskresenskaya E.N., et al. Composite materials based on ultrahigh-molecular polyethylene: properties, outlooks for use. *Chemistry for Sustainable Development*. 2010;18(3):301–314.
7. Wang H., Xu L., Zhang M., et al. More wear-resistant and ductile UHMWPE composite prepared by the addition of radiation cross-linked UHMWPE powder. *Journal of Applied Polymer Science*. 2017;134(13):44643. <https://doi.org/10.1002/app.44643>.
8. Salama A., Kamel B.M., Osman T.A., Rashad R.M. Investigation of mechanical properties of UHMWPE composites reinforced with HAP+ TiO<sub>2</sub> fabricated by solvent dispersing technique. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022;21:4330–4343. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.11.038>.
9. Охлопкова Т.А. Триботехнические материалы на основе СВМПЭ, модифицированного наноразмерными оксидными керамиками: Дис. ... канд. техн. наук. Томск; 2018. 156 с.
10. Okhlopko T.A. Tribotechnical materials based on UHMWPE modified with nanoscale oxide ceramics: Diss. ... Cand. Sci, Tomsk; 2018. 156 p. (In Russ.)
11. Danilova S.N., Yarusova S.B., Kulchin Y.N., et al. UHMWPE/CaSiO<sub>3</sub> nanocomposite: Mechanical and tribological properties. *Polymers*. 2021;13(4):570. <https://doi.org/10.3390/polym13040570>.
12. Wu H., Zhu L.N., Yue W., et al. Wear-resistant and hydrophobic characteristics of PTFE/CF composite coatings. *Progress in Organic Coatings*. 2019;128:90–98. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.12.013>.
13. Васильев А.П., Стручкова Т.С., Лазарева Н.Н. и др. Влияние дисульфида молибдена и углеродных волокон на свойства и структуру полимерных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2022;27(4):618–630. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-618-630>.
14. Vasilev A.P., Struchkova T.S., Lazareva N.N., et al. Effect of molybdenum disulphide and carbon fibers on the properties and structure of polymer composite materials based on polytetrafluoroethylene. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022;27(4):618–630. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-618-630>. (In Russ.)
15. Kadykova Y.A. A structural polymeric composite material reinforced with basalt fiber. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2012;85:1434–1438. <https://doi.org/10.1134/S1070427212090212>.
16. Данилова С.Н., Охлопкова А.А., Гаврильева А.А. и др. Износостойкие полимерные композиционные материалы с улучшенным межфазовым взаимодействием в системе «Полимер-волокно». *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова*. 2016;5(55):80–92.
17. Danilova S.N., Okhlopko A.A., Gavrilieva A.A., et al. Wear resistant polymer composite materials with improved interfacial interaction in the system “polymer-fiber”. *Vestnik NEFU*. 2016;5(55):80–92. (In Russ.)
18. Bednarowski D., Bazan P., Kuciel S. Enhancing strength and sustainability: evaluating glass and basalt fiber-reinforced biopolyamide as alternatives for petroleum-based polyamide composite. *Polymers*. 2023;15(16):3400. <https://doi.org/10.3390/polym15163400>.
19. Chukov D.I., Stepashkin A.A., Maksimkin A.V., et al. Investigation of structure, mechanical and tribological properties of short carbon fiber reinforced UHMWPE-matrix composites. *Composites Part B: Engineering*. 2015;76:79–88. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.02.019>.
20. Cui W., Yang S., Zhang X., et al. High wear resistance of ultralow-wear polyethylene with different molecular weights under different contact pressure. *Tribology Letters*. 2022;70(2):51. <https://doi.org/10.1007/s11249-022-01595-2>.
21. Жорник В.И., Ковалева С.А., Григорьева Т.Ф. и др. Формирование структуры высоконаполненных композитов на основе СВМПЭ в условиях интенсивной механической активации для получения радиационно-защитных материалов. *Механика машин, механизмов и материалов*. 2019;(4):70–78.
22. Zhornik V.I., Kovaliova S.A., Grigoryeva T.F., et al. Formation of structure of highly filled UHMWPE composites under conditions of intensive mechanical activation for radiation protective materials. *Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*. 2019;(4):70–78. (In Russ.)
23. Guo Z., Xu R., Xue P. Study on preparation of ultrahigh-molecular-weight polyethylene pipe of good thermal-mechanical properties modified with organo-montmorillonite

lonite by screw extrusion. *Materials*. 2020;13(15):3342. <https://doi.org/10.3390/ma13153342>.

17. Дебердеев Т.Р., Андрианова К.А., Амирова Л.М. Обзор путей развития и применения полимерных волоконистых композиционных материалов. *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2021;6(396):5–13. [https://doi.org/10.47367/0021-3497\\_2021\\_6\\_5](https://doi.org/10.47367/0021-3497_2021_6_5).

Deberdeev T.R., Andrianova K.A., Amirova L.M. Overview of development and application ways of polymer fiber composite materials. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti*. 2021;6(396):5–13. [https://doi.org/10.47367/0021-3497\\_2021\\_6\\_5](https://doi.org/10.47367/0021-3497_2021_6_5). (In Russ.)

18. 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): 223–229. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2023.04.028>.

Ushkanov A.A., Lazareva N.N., Okhlopkova A.A., Vasilev A.P. Research of polymer composite materials based on polytetrafluoroethylene and carbon fibers. *Polzunovskiy Vestnik*. 2023;(4):223–229. <https://doi.org/10.25712/ASTU.2072-8921.2023.04.028>. (In Russ.)

19. Vadivel H.S., Golchin A., Emami N. Tribological behaviour of carbon filled hybrid UHMWPE composites in water. *Tribology International*. 2018; 124:169–177. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.04.001>.

20. Буров А.Е. Модели разрушения волоконистых композиционных материалов. *Сибирский аэрокосмический журнал*. 2008;3(20):133–138.

Burov A.E. Models of failure of fibrous composites. *Vestnik of SibGAU*. 2008;3(20):133–138. (In Russ.)

21. Екименко А.Н. Перспективы использования органосиланов в термопластичных композитах с растительным наполнителем. *Пластические массы*. 2018;(1-2):28–33.

Ekimenko A.N. The organosilanes prospects in thermoplastic composites with vegetable fillers. *Plasticheskie Massy*. 2018;(1-2):28–33. (In Russ.)

22. Wang B., Yu S., Mao J., et al. Effect of basalt fiber on tribological and mechanical properties of polyetherether-ketone (PEEK) composites. *Composite Structures*. 2021;266:113847. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113847>.

23. 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. *Южно-Сибирский научный вестник*. 2020;(1):89–95.

Vasilev A.P., Struchkova T.S., Okhlopkova A.A., Alekseev A.G. Study of the influence of carbon and basalt fibers with ultradisperse PTFE on the tribological properties of polytetrafluoroethylene. *South-Siberian Scientific Bulletin*. 2020;(1):89–95. (In Russ.)

24. Краснов А.П., Наумкин А.В., Юдин А.С. и др. Природа первичных актов фрикционного взаимодействия СВМПЭ с поверхностью стали. *Трение и износ*. 2013;34(2):154–164. <https://doi.org/10.3103/S1068366613020074>.

Krasnov A.P., Naumkin A.V., Yudin A.S., et al. Nature of initial acts of friction of ultrahigh molecular weight polyethylene with steel surface. *Journal of Friction and Wear*. 2013;34(2):120–128. <https://doi.org/10.3103/S1068366613020074>.

25. Liu H., Luo B., Shen S., Li L. Design and mechanical tests of basalt fiber cloth with MAH grafted reinforced bamboo and poplar veneer composite. *European Journal of Wood and Wood Products*. 2019;77:271–278. <https://doi.org/10.1007/s00107-018-1378-9>.

26. Kim H.I., Hang W., Choi W.-Ki, et al. Effects of maleic anhydride content on mechanical properties of carbon fibers-reinforced maleic anhydride-grafted-polypropylene matrix composites. *Carbon Letters*. 2016;20:39–46. <https://doi.org/10.5714/CL.2016.20.039>

#### Об авторах

**ДАНИЛОВА Сахаяна Николаевна**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-5901-6387>, ResearcherID: AAZ-5494-2021, Scopus Author ID: 56433195400, SPIN: 7014-2980, e-mail: dsn.sakhayana@mail.ru

**ОХЛОПКОВА Айгалина Алексеевна**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник-руководитель лабораторией, <https://orcid.org/0000-0003-0691-7066>, ResearcherID: A-6594-2014, Scopus Author ID: 6701324722, SPIN: 5495-1617, e-mail: okhlopkova@yandex.ru

**ОКОНЕШНИКОВА Анастасия Васильевна**, студент 5 курса, <https://orcid.org/0000-0002-3647-2718>, Scopus Author ID: 58627381700, SPIN: 7804-9770, e-mail: anasema2003@mail.ru

#### Вклад авторов

**Данилова С.Н.** – разработка концепции, методология, администрирование данных, визуализация, создание черновика рукописи; **Охлопкова А.А.** – редактирование рукописи, руководство исследованием, получение финансирования, администрирование проекта; **Оконешникова А.В.** – верификация данных, проведение исследования, проведение статистического анализа



***Конфликт интересов***

Один из авторов – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Охлопкова А.А. является членом редакционной коллегии журнала «Природные ресурсы Арктики и Субарктики». Авторам неизвестно о каком-либо другом потенциальном конфликте интересов, связанном с этой статьей.

***About the authors***

**DANILOVA, Sakhayana Nikolaevna**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-5901-6387>, ResearcherID: AAZ-5494-2021, Scopus Author ID: 56433195400, SPIN: 7014-2980, e-mail: dsn.sakhayana@mail.ru

**OKHLOPKOVA, Aitalina Alekseevna**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, Head of the Laboratory, <https://orcid.org/0000-0003-0691-7066>, ResearcherID: A-6594-2014, Scopus Author ID: 6701324722, SPIN: 5495-1617, e-mail: okhlopkova@yandex.ru

**OKONESHNIKOVA, Anastasia Vasilievna**, Student, <https://orcid.org/0000-0002-3647-2718>, Scopus Author ID: 58627381700, SPIN: 7804-9770, e-mail: anasema2003@mail.ru

***Authors' contribution***

**Danilova S.N.** – conceptualization, methodology, data curation, visualization, writing – original draft; **Okhlopkova A.A.** – writing – review & editing, supervision, funding acquisition, project administration; **Okoneshnikova A.V.** – validation, investigation, formal analysis

***Conflict of interest***

One of the authors, Okhlopkova A.A., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher is a member of the editorial board for the journal “Arctic and Subarctic Natural Resources”. The authors are not aware of any other potential conflict of interest relating to this article.

*Поступила в редакцию / Submitted 27.04.2024*

*Поступила после рецензирования / Revised 17.09.2024*

*Принята к публикации / Accepted 15.10.2024*