



Научная статья

2.6.11 – Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов
УДК628.16

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.024



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ БОРПОЛИМЕРА НА СВОЙСТВА СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

Сахаяна Николаевна Данилова ¹, Елена Софроновна Ефимова ²,
Надежда Николаевна Лазарева ³, Айталипа Алексеевна Охлопкова ⁴,
Алексей Геннадьевич Туисов ⁵

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

¹ dsn.sakhayana@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5901-6387>

³ lazareva-nadia92@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5090-0793>

⁴ okhlopkova@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0691-7066>

² Городская Классическая Гимназия, г. Якутск, Россия

² kraura4@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8144-5583>

⁵ Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр СО РАН», г. Якутск, Россия

⁵ tuisovag@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6819-1937>

Аннотация. В работе рассмотрено влияние борполимера в вязкотекучем состоянии на физико-механические, триботехнические и термодинамические свойства сверхвысокомолекулярного полиэтилена. Полученные результаты обосновываются и дополняются исследованиями структуры композитов методом ИК-спектроскопии и сканирующей электронной микроскопии. Борполимер перевели в вязкотекучее состояние с помощью органического растворителя на основе эпоксиангидридного связующего. Методом ИК-спектроскопии установили, что растворитель в основном содержит эпоксидные, формальдегидные, альдегидные и гидроксильные группы. Порошок полимера и навеску вязкого борполимера смешивали в лопастном смесителе, далее полученные смеси перерабатывали методом горячего прессования с последующим получением образцов. Результаты исследований свойств образцов свидетельствуют о том, что введение вязкотекучего борполимера приводит к повышению их механических свойств. Отмечено, что композиты, содержащие борполимер, характеризуются повышением прочности при растяжении на 44 % и модуля упругости на 62 % относительно исходного сверхвысокомолекулярного полиэтилена. Полученные результаты объяснили структурными исследованиями. Надмолекулярная структура образцов при меньшем содержании борполимера характеризуется формированием сферолитной структуры, а с увеличением концентрации происходит разрыхление и разупорядочивание структуры («аморфизация»). Это подтверждается результатами исследования методом дифференциально-сканирующей калориметрии, с помощью которой отмечено снижение степени кристалличности на 7–12 % и энthalпии плавления на 6–12 % относительно полимерной матрицы. Трибологические испытания показывают снижение коэффициента трения на 21 %, что обусловлено влиянием борполимера как смазочного материала в процессах трения, облегчая скольжение материала по поверхности стального контртела. Морфология поверхности трения и их ИК-спектры подтверждают полученные результаты. Показано, что борполимер активно участвует в трибохимических процессах и формирует вторичную структуру на поверхности трения композита.

Ключевые слова: сверхвысокомолекулярный полиэтилен, борполимер, полимер-полимерные композиционные материалы.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект №FSRG-2024-0004).

Для цитирования: Исследование влияния борполимера на свойства сверхвысокомолекулярного полиэтилена / С. Н. Данилова [и др.] // Ползуновский вестник. 2024. № 1, С. 197–204. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.01.024. EDN: <https://elibrary.ru/OQEZLU>.

Original article

A STUDY OF THE INFLUENCE OF BORPOLYMER ON THE PROPERTIES OF ULTRA-HIGH MOLECULAR POLYETHYLENE

Sakhayana N. Danilova ¹, Elene S. Efimova ², Nadezhda N. Lazareva ³,
Aitalina A. Okhlopko ⁴, Aleksei G. Tuisov ⁴

^{1, 3, 4} North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

¹ dsn.sakhayana@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5901-6387>

³ lazareva-nadia92@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5090-0793>

⁴ okhlopko@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0691-7066>

² City Classical Gymnasium, Yakutsk, Russia

² kraura4@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8144-5583>

⁵ The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the RAS, Yakutsk, Russia

⁵ tuisovag@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6819-1937>

Abstract. This paper examines the properties and structure of polymer-polymer composites based on ultra-high molecular weight polyethylene and borpolymer in a viscous flow state. The borpolymer was dissolved using an organic solvent based on an epoxy anhydride binder. Analysis using IR spectroscopy showed that the solvent mainly contains epoxy, formaldehyde, aldehyde, and hydroxyl groups. The polymer powder and the weighed portion of the borpolymer were mixed. The composition mixtures were processed by hot pressing to obtain composites. The results of studying the properties of samples indicate that the outline of borpolymer leads to an increase in mechanical properties. It is noted that composites are characterized by an increase in tensile strength by 44% and in elasticity modulus by 62% relative to the original polymer. The obtained data from the results of mechanical studies are confirmed by the formation of a spherulitic structure of the composite at a lower content of borpolymer. The formation of spherulitic structures in ultra-high molecular weight polyethylene indicates its structuration and ordering, due to which the strength indicators increase. The formation of a loose and disordered structure of the polymer composite material at high borpolymer contents was recorded. This is confirmed by studies using differential scanning calorimetry, in which a decrease in the degree of crystallinity by 7-12% and a decrease in the enthalpy of melting by 6-12% relative to the polymer matrix was noted. Tribological tests show a decrease in the coefficient of friction by 21%, which is due to the influence of borpolymer as a lubricant in friction processes, facilitating the sliding of the material over the surface of the steel counterbody. The study of the friction surface by scanning electron microscopy indicates the active participation of borpolymer in tribochemical processes. As a result, the formation of a more wear-resistant layer, the so-called "secondary structures", is observed on the friction surface of composites containing borpolymer. IR spectra of the friction surface are characterized by the presence of peaks corresponding to oxygen-containing compounds - hydroxyl- and carboxy-groups. This confirms the occurrence of tribochemical reactions during friction.

Keywords: ultra-high molecular weight polyethylene, borpolymer, polymer-polymer composite materials.

Acknowledgements: The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FSRG-2024-0004).

For citation: Danilova, S.N., Efimova, E.S., Lazareva, N.N., Okhlopko, A.A. & Tuisov, A.G. (2024). A study of the influence of borpolymer on the properties of ultra-high molecular polyethylene. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 197-204. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2024.01.024. EDN: <https://elibrary.ru/OQEZLU>.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие возрастает интерес по освоению природных ресурсов Арктики, Сибири и Дальнего Востока, что подтверждается стратегическим направлением развития Российской Федерации, постановление которой действует до 2035 г. (Указ Президента Российской Федерации от 26.10.2020 г. № 645). Известно, что в этих регионах из-за суровых климатических

условий добыча полезных ископаемых сталкивается с проблемами, которые обусловлены непригодностью технологического оборудования. Больше всего к поломке подвержены детали и запчасти горнодобывающего оборудования из полимерных материалов, которые не всегда отвечают показателям по износостойкости и морозостойчивости. Поэтому необходимо разработать новый класс материалов, которые

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ БОРПОЛИМЕРА НА СВОЙСТВА СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

будут обладать повышенными эксплуатационными характеристиками. Преимуществом полимерных композиционных материалов (ПКМ) является возможность регулирования его свойств за счет подбора полимерной матрицы, вводимых наполнителей и технологии их модифицирования. Одним из перспективных полимерных матриц для изготовления морозо- и износостойких материалов выступает сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ). Известно, что температурный интервал эксплуатации СВМПЭ может достигать от -120 до $+80-100$ °С из-за высокой молекулярной массы. Благодаря этому СВМПЭ может сохранять свои основные качества, как ударостойкость и высокую ударную вязкость при низких температурах [1].

В настоящее время отмечается рост исследований по разработке полимер-полимерных композиционных материалов (ППК), в котором в качестве модифицирующей добавки используют полимер, отличный по свойствам от связующего [2]. В частности, используют полиэфир, свойства которых зависят от химического состава, молекулярной массы и наличия функциональных групп.

Благодаря особенностям синтеза нового класса – бор-кислородсодержащих полимеров, содержащих связи В–О, которые расширили его практическое применение. Полиметилен-п-трифениловый эфир борной кислоты (борполимер, БП) относится к классу борорганических соединений, который широко применяется в различных областях химической технологии, в том числе в материаловедении: с целью повышения огнестойкости изделий [3], изготовления пористых конструкций [4] и в качестве модифицирующей добавки к полимерам [5–6]. Известны работы, посвященные исследованию БП в качестве добавки в эпоксидные и резиновые матрицы [7–9]. Анализ литературных данных показал, что борорганические соединения в качестве наполнителя для СВМПЭ практически не изучены. В ранних работах авторов была показана эффективность использования борполимера в качестве модифицирующей добавки для СВМПЭ, повышающей износостойкость ПКМ [10]. В этой работе [10] твердый борполимер измельчали механически и вводили непосредственно в СВМПЭ. Сложностью данной технологии является регулирование размеров измельченных частиц БП и его равномерное распределение в матрице.

Целью настоящей работы является разработка и исследование полимер-полимерных композиционных материалов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве полимерной матрицы использовали СВМПЭ марки GUR-4022 (Celanese, Китай) с молекулярной массой 5 млн г/моль. В качестве наполнителя выступает БП (ООО «Боропласт», Россия), представляющий собой продукт поликонденсации трифенилового эфира борной кислоты и формальдегида, с молекулярно-массовым распределением основного вещества ≥ 99 %. Для улучшения совмещения с полимерной матрицей борполимер предварительно растворили в компонентах эпоксиангидридного связующего, представленной в работе [11]. Смешение компонентов ППК проводили в лопастном смесителе при скорости вращения ротора 2400 об/мин. Композиты изготавливали методом горячего прессования при температуре 175 °С и давлении 10 Мпа с выдержкой 20 мин.

Физико-механические свойства исследовали на машине Autograph Shimadzu AGS-J по ГОСТ 11262 при скорости движения подвижных захватов – 50 мм/мин. Напряжение при сжатии определяли согласно ГОСТ 4651-2014. Износостойкость ППК определяли на трибометре UMT-3 (CETR, США) по схеме трения «палец-диск» в течение 3 ч при скорости вращения 0,5 м/с и нагрузке 160 Н.

Структуру композита в объеме и на поверхности трения исследовали на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) JSM-7800F (Jeol, Япония). Анализ борполимера проводили с применением ИК-спектрометра с Фурье-преобразованием марки Varian 7000 FT-IR (Varian, США) и на рентгеноструктурном анализаторе (PCA) ARL X'Tra (Thermo Fisher Scientific, Швейцария).

Термодинамические свойства ППК исследовали на дифференциальном сканирующем калориметре DSC 204F1 Phoenix (NETZSCH, Германия) при скорости нагрева 20 °С/мин и с массой навески образцов $18 \pm 0,9$ мг.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ

На рисунке 1 приведена рентгенограмма борполимера, полученная с помощью рентгеновского дифрактометра.

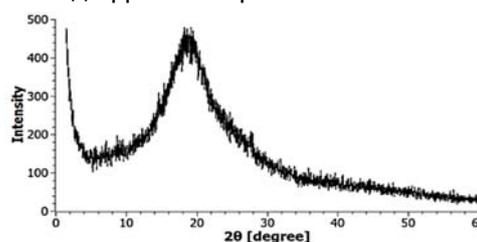


Рисунок 1 – Рентгенограмма БП

Figure 1 – X-ray of BP

Из результатов РСА выявлено, что исходный борполимер является аморфным соединением, и для него характерен широкий пик с малой интенсивностью в области ($2\theta=10-30^\circ$). В исследуемом образце БП других пиков в области исследования $2\theta = 1,5-60^\circ$ не зарегистрировано.

Для качественного анализа состава БП, провели исследование его в твердом и в растворенном виде с помощью метода ИК-спектроскопии (рис. 2).

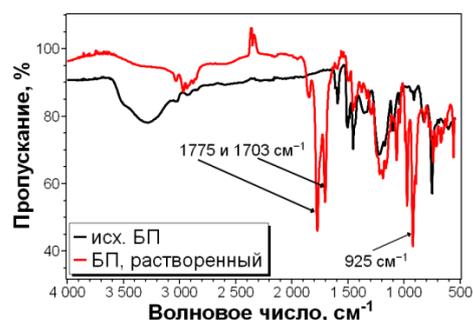


Рисунок 2 – ИК-спектры БП в твердом (черный) и вязкотекучем (красный) состоянии, полученного растворением

Figure 2 – IR-spectra of BP in the solid (black) and viscous-flowing (red) state obtained by dissolution

На ИК-спектрах БП зарегистрированы характеристические пики бензольных колец: 1045 и 1095 см^{-1} , соответствующие колебаниям С-Н связи (метил) в плоскости бензольного кольца и пик 750 см^{-1} , вызванный колебанием вне плоскости бензольного кольца С-Н связи. Обнаружены интенсивные пики в области поглощения при $1590-1455\text{ см}^{-1}$, которые вызваны колебаниями кратной связи (С=С) ароматического кольца. Наблюдаемая широкая полоса поглощения в области 3290 см^{-1} относится к колебаниям С-Н связей бензольного кольца [12], а пик при 1350 см^{-1} относится к деформационным колебаниям связи В-О. Асимметричные валентные колебания связи В-С в трифенилборах относятся к пику поглощения при 1220 см^{-1} . В то время как симметричные колебания связи В-С характеризуются появлением пика при 825 см^{-1} [13].

ИК-спектр растворенного БП отличается появлением новых пиков, характерных для кислородсодержащих групп. Так, зафиксированы пики поглощения при 1775 и 1703 см^{-1} , относящиеся к колебаниям $-\text{COOH}$ и $-\text{COX}$ функциональных групп. Широкая полоса поглощения в области $3020-3600\text{ см}^{-1}$ является характерной для гидроксигруппы и указывает на наличие водородных связей [12]. Интенсивный пик при 920 см^{-1} соответствует колебаниям эпоксидной

группы С-О-С [14]. Установлено, что зафиксированные ИК-спектры соответствуют БП и использованному растворителю.

Результаты исследования ПКМ при растяжении и при сжатии в зависимости от содержания БП представлены на рис. 3.

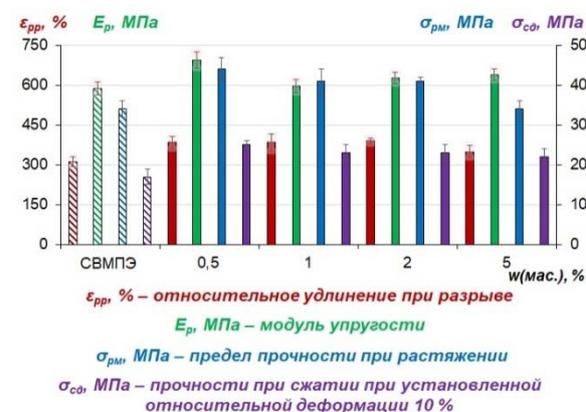


Рисунок 3 – Зависимость физико-механических свойств ПКМ от содержания БП
Figure 3 – Dependence of mechanical properties of PCM on BP content

Результаты исследований свидетельствуют, что максимальное повышение прочностных показателей ППК достигают при введении $0,5\text{ мас.}\%$ БП. Так, зафиксировано повышение прочности при растяжении на 29% , прочности при сжатии при установленной деформации 10% – на 47% и прочности при сжатии при установленной деформации 25% – на 20% по сравнению с ненаполненным СВМПЭ. Дальнейшее увеличение содержания БП не ухудшает прочностные свойства ППК. Установлено, что максимальное увеличение относительного удлинения наблюдается у ППК, содержащего $2\text{ мас.}\%$ БП, которое отличается повышением на 25% относительно исходного СВМПЭ. Кроме того, зафиксировано некоторое повышение модуля упругости во всем концентрационном интервале содержания БП. Так, максимальное увеличение показателя достигает 695 МПа при содержании $0,5\text{ мас.}\%$ БП. Наблюдаемое повышение деформационно-прочностных свойств ППК может быть обусловлено взаимодействием БП со СВМПЭ в пределах аморфной фазы.

Надмолекулярная структура СВМПЭ и ППК на его основе в зависимости от содержания БП приведена на рисунке 4.

Из рисунка 4 видно, что композиты характеризуются формированием сферолитоподобных структур. Исследование распределения наполнителя в объеме СВМПЭ показало, что наполнитель распределен хаотично, что при-

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ БОРПОЛИМЕРА НА СВОЙСТВА СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

водит к образованию разнообразных надмолекулярных структурных (дефектные области и сферолитные структуры) элементов. С увеличением содержания наполнителя структура ППК становится менее упорядоченной.

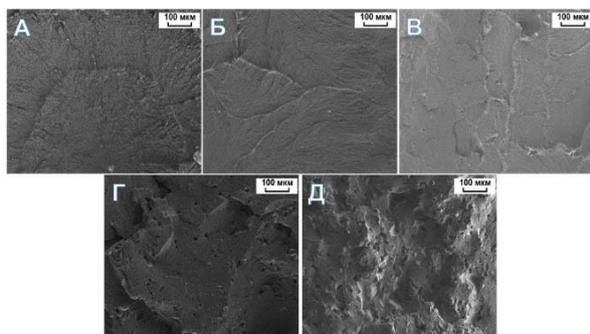


Рисунок 4 – Надмолекулярная структура СВМПЭ (а) и ПКМ в зависимости от содержания БП: б) 0,5 %; в) 1 %; г) 2 %; д) 5 %

Figure 4 – Microphotograph of the surface of UHMWPE (a) and PCM depending on the concentration of BP: б) 0,5%, в) 1%, г) 2%, д) 5%

В таблице 1 приведены результаты исследования методом ДСК. Как видно из табл. 1, температура плавления композитов во всем концентрационном интервале наполнения борполимером СВМПЭ изменяется незначительно. При увеличении содержания БП в СВМПЭ зафиксировано снижение степени кристалличности от 4 до 12 %. Данное явление может быть объяснено «аморфизацией» самого СВМПЭ при введении вязкотекучего БП, что приводит к разрыхлению структуры композита. Так, на рисунке 3 наблюдается образование агломератов, которые ограничивают скорость кристаллизации полимера. Следовательно, наполнитель влияет на рост и форму кристаллитов в процессе структурирования композита, что приводит к некоторой деформации кристаллических областей.

Таблица 1 – Результаты исследований композитов методом ДСК

Table 1 – Results of studies of composites using the DSC method

Содержание БП, мас. %	Значение		
	$T_{пл.}, ^\circ C$	$\Delta H_{пл.}, Дж/г$	$\alpha, \%$
0	127,6	171,0	57,9
0,5	126,0	160,0	55,6
1,0	126,6	155,2	53,3
2,0	126,5	153,4	51,9
5,0	125,6	151,9	50,8

Примечания: $T_{пл.}, ^\circ C$ – температура плавления; $\Delta H_{пл.}, Дж/г$ – энтальпия плавления; $\alpha, \%$ – степень кристалличности.

Установлено, что с увеличением концентрации БП в композите энтальпия плавления постепенно уменьшается от 6 до 11 % по сравнению с исходным СВМПЭ. При этом уменьшение значений энтальпии плавления и степени кристалличности не приводит к снижению механических параметров материала. Это обусловлено тем, что за счет эффекта связывания проходных цепей аморфной фазы СВМПЭ вносится вклад на ударную вязкость материала [15].

Результаты исследований трибологических свойств ППК приведены на рис. 5.

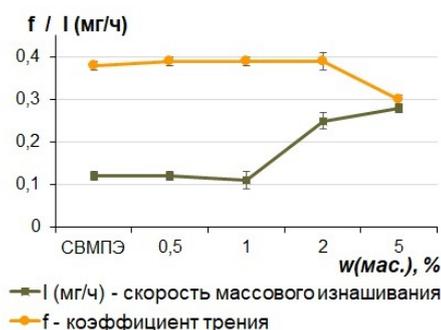


Рисунок 5 – Зависимость трибологических результатов ППК от содержания БП

Figure 5 – Dependence of tribological results of PPC on BP content

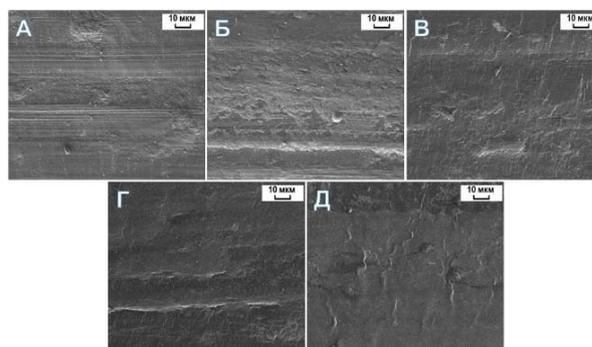


Рисунок 6 – Морфология поверхностей трения СВМПЭ (а) и ПКМ в зависимости от содержания БП: б) 0,5 %; в) 1 %; г) 2 %; д) 5 %

Figure 6 – Micrographs of friction surfaces of UHMWPE (a) and PCM depending on the content of BP: б) 0,5%, в) 1%, г) 2%, д) 5%

Результаты исследования трибологических свойств ППК показывают, что введение 0,5 и 1,0 мас. % концентрации БП в СВМПЭ не приводят к изменению значений скорости массового изнашивания относительно исходного полимера. Выявлено, что увеличение концентрации БП в СВМПЭ до 5,0 мас. % сопровождается увеличением скорости массового изнашивания в ~2 раза. Тем не менее, коэффициент трения ППК, содержащего 5,0 мас. % БП, снижается на 21 %. Коэффици-

циенты трения остальных композитов не меняются.

Для объяснения изменения трибологических свойств ППК провели исследования поверхностей трения композитов методами ИК-спектроскопии и СЭМ. На рисунке 6 приведены микрофотографии поверхностей трения СВМПЭ и ПКМ.

Из рисунка 6 видно, что поверхность трения исходного СВМПЭ характеризуется наличием бороздок, ориентированных вдоль направления трения. При содержании наполнителя 0,5–2 мас.% на поверхности трения ПКМ заметны частицы износа, а также дискретное формирование вторичных структур. Следует учитывать, что мягкий наполнитель также может выходить на поверхность трения и участвовать в трибохимических процессах. Участие БП в трибохимических процессах можно доказать с помощью ИК-спектров поверхностей трения ППК (рис. 7).

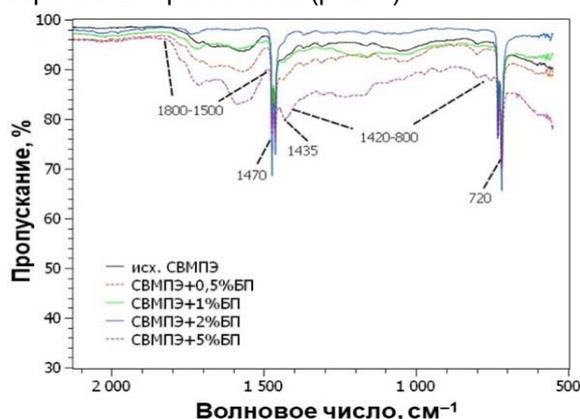


Рисунок 7 – ИК-спектры поверхностей трения СВМПЭ и композитов

Figure 7 – IR-spectra of friction surfaces of UHMWPE and composites

На ИК-спектрах (рис. 7) зафиксировано наличие основных пиков поглощения СВМПЭ, таких как пики при 1470 и 1365 см^{-1} характерны для валентных и деформационных колебаний – CH_2 связи, а также пик при 720 см^{-1} , вызванный маятниковыми колебаниями полимерной цепи. ИК-спектры ППК после трения отличаются появлением новых пиков при 1800–1500 см^{-1} , обусловленных колебаниями карбокси- и карбонильных групп. Появление этих пиков свидетельствует о протекании трибоокислительных процессов при изнашивании материала. При этом зафиксировано увеличение интенсивности пиков кислородсодержащих групп по мере увеличения содержания БП в композитах. Видно, что интенсификация окислительных процессов с увеличением содержания БП сопровождается расширением полосы поглощения в

области 1420–800 см^{-1} , которая относится к колебаниям связи С-О [12]. Это свидетельствует о том, что трение ПКМ сопровождается образованием большого количества эфирных связей на поверхности трения, что, возможно, обусловлено наличием растворителя БП – эпоксиангидридного связующего.

Известно [10], что при изнашивании ПКМ происходит перестройка поверхностных слоев материала, которая иногда сопровождается формированием более износостойкого вторичного слоя. В этом случае следует предполагать, что жидкий БП, находящийся внутри каркаса полимерной цепи СВМПЭ, может вытекать в зону трения и активно окисляться в ней. При этом БП может играть роль смазочного материала, снижая адгезионную составляющую трения и облегчая процессы скольжения, и наблюдается снижение коэффициента трения ППК. Однако такой процесс сопровождается снижением массы образца.

Таким образом, в результате исследования поверхности трения зафиксировано формирование вторичных структур на поверхности трения ППК, обусловленных протеканием трибоокислительных процессов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании результатов проведенных исследований установлено, что борполимер в вязкотекучем состоянии является эффективным модификатором СВМПЭ даже при малых концентрациях (при 0,5 мас. %). Показано, что введение БП приводит к повышению прочности при растяжении на 29 %, прочности при сжатии при установленной относительной деформации 10 и 25 % на 47 % и на 20 % соответственно по сравнению с исходным СВМПЭ. Исследование термодинамических параметров показало, что БП способствует к общему снижению степени кристалличности и энтальпии плавления СВМПЭ на 12 %. На основании трибологических исследований установлено, что введение 5 мас.% БП в матрицу способствует снижению коэффициента трения на 21 %. Исследование морфологии поверхности трения ППК выявило формирование более износостойкой вторичной структуры, что указывает об участии БП в структурно-фазовых процессах, протекающих при трении. Помимо этого, борполимер может облегчать процессы скольжения при трении, т.е. играет роль смазочного материала в паре трения «полимер-стальное контртело».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разработка износостойких полимер-полимерных композиционных материалов на основе СВМПЭ / С.Н. Данилова [и др.] // Природные

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ БОРПОЛИМЕРА НА СВОЙСТВА СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

ресурсы Арктики и Субарктики. 2020. Т. 25, № 3. С. 130–142. doi 10.31242/2618-9712-2020-25-3-X.

2. Самоармированные полимерные композиты – классификация, получение, механические свойства и применение (обзор) / Д.В. Севастьянов [и др.] // Труды ВИАМ. 2017. № 4 (52). С. 104–118. doi 10.18577/2307-6046-2017-0-4-12-12.

3. Abdalla M.O., Ludwick A., Mitchell T. Boron-Modified Phenolic Resins for High Performance Applications // *Polymer*. 2003. Vol. 44, № 24. P. 7353–7359. doi 10.1016/j.polymer.2003.09.019.

4. Recent Advances in Boron-Containing Conjugated Porous Polymers / F. Qiu [et al.] // *Polymers*. 2016. Vol. 8, № 5. P. 191. doi 10.3390/polym8050191.

5. Kurt R., Mengeloglu F., Meric H. The Effects of Boron Compounds Synergists with Ammonium Polyphosphate on Mechanical Properties and Burning Rates of Wood-HDPE Polymer Composites // *European Journal of Wood and Wood Products*. 2012. Vol. 70, № 1–3. P. 177–182. doi 10.1007/s00107-011-0534-2.

6. Synthesis and Properties of Graphene Oxide-Boron-Modified Phenolic Resin Composites / X. Yi [et al.] // *High Performance Polymers*. 2016. Vol. 28, № 5. P. 505–517. doi 10.1177/0954008315587953.

7. Wang D.C., Chang G.W., Chen Y. Preparation and Thermal Stability of Boron-Containing Phenolic Resin/Clay Nanocomposites // *Polymer Degradation and Stability*. 2008. Vol. 93, № 1. P. 125–133. doi 10.1016/j.polymdegradstab.2007.10.021.

8. A Study of the Modifying Effect of Additions of Boric Acid Polymethylene-p-Triphenyl Ester in Rubber-Based Polymer Composites. Part 3 / D.V. Korabel'nikov [et al.] // *International Polymer Science and Technology*. 2016. Vol. 43, № 2. P. 11–14. doi 10.1177/0307174X160430020.

9. Androshchuk A.A., Lenskii M.A., Belousov A.M. The Interaction of Polyesters and Polymethylene Esters of Phenols and Boric Acid with Epoxy Resin // *International Polymer Science and Technology*. 2011. Vol. 38, № 1. P. 33–36. doi 10.1177/0307174X1103800107.

10. Tribological Properties of Composites Based on a UHMWPE Modified Boropolymer / A.A. Okhlopko [et al.] // *Journal of Friction and Wear*. 2022. Vol. 43, № 1. P. 27–34. doi 10.3103/S1068366622010081.

11. Исследование процесса растворения борполимера в эпоксиангидридном связующем / А.Г. Туисов [и др.] // *Ползуновский вестник*. 2020. № 4. С. 117–120. doi 10.25712/ASTU.2072-8921.2020.04.022.

12. Nandiyanto A.B.D., Oktiani R., Ragadhita R. How to Read and Interpret FTIR Spectroscopy of Organic Material // *Indonesian Journal of Science and Technology*. 2019. Vol. 4, № 1. P. 97–118. doi 10.17509/ijost.v4i1.15806.

13. Shurvell H.F., Faniran J.A. Infrared Spectra of Triphenylboron and Triphenylborate // *Canadian Journal of Chemistry*. 1968. Vol. 46, № 12. P. 2081–2087.

14. Multifold interface and multilevel crack propagation mechanisms of graphene oxide/ polyurethane/epoxy membranes interlaminar-toughened carbon fiber-reinforced polymer composites / Li B. [et al.]

// *Journal of Materials Science*. 2018. Vol. 53. P. 15939–15951. doi 10.1007/s10853-018-2753-y.

15. Peacock A.J. Handbook of polyethylene: structures: properties, and applications. Boca Raton: CRCpress, 2000. 544 p.

Информация об авторах

С. Н. Данилова – младший научный сотрудник лаборатории «Полимерные композиты для Севера», Институт естественных наук, ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова».

Е. С. Ефимова – ученица 11 класса, МОБУ «Городская классическая гимназия».

Н. Н. Лазарева – к.т.н., в.н.с.-зав.лаб. УНТЛ «Технологии полимерных нанокompозитов им. С.А. Слепцовой» Института естественных наук ФГАОУ ВО «СВФУ им. М.К. Аммосова».

А. А. Охлопкова – д.т.н., главный научный сотрудник – руководитель лаборатории УНТЛ «Технологии полимерных нанокompозитов им. С.А. Слепцовой», Институт естественных наук, ФГАОУ ВО «Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова».

А. Г. Туисов – к.т.н., руководитель «Лаборатории композитных материалов Арктики и Субарктики» Федерального исследовательского центра ЯНЦ СО РАН».

REFERENCES

1. Danilova, S.N., Yarusova, S.B., Okhlopko, A.A., Gordienko, P.S., Sleptsova, S.A., Buravlev, I.YU., Wang, L. & Czyao, Y. (2020). The development of wear-resistant polymer-polymer composite materials based on UHMWPE. *Arctic and Subarctic natural resources*, 25 (3), 130-142. (In Russ.). DOI: 10.31242/2618-9712-2020-25-3-X.

2. Sevast'yanov, D.V., Doriomedov, M.S., Daskovskij, M.I. & Skripachev, S.YU. (2017). Single-polymer composites - classification, synthesis, mechanical properties and application (review). *Proceedings of VIAM*, 4 (52), 104-118. (In Russ.). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-4-12-12.

3. Abdalla, M.O., Ludwick, A. & Mitchell, T. (2003). Boron-Modified Phenolic Resins for High Performance Applications. *Polymer*, 44 (24), 7353-7359. DOI: 10.1016/j.polymer.2003.09.019.

4. Qiu, F., Zhao, W., Han, S., Zhuang, X., Lin, H. & Zhang, F. (2016). Recent Advances in Boron-Containing Conjugated Porous Polymers. *Polymers*, 8(5), 191. DOI: 10.3390/polym8050191.

5. Kurt, R., Mengeloglu, F. & Meric, H. (2012). The Effects of Boron Compounds Synergists with Ammonium Polyphosphate on Mechanical Properties and Burning Rates of Wood-HDPE Polymer Composites. *European Journal of Wood and Wood Products*, 70 (1-3), 177-182. DOI: 10.1007/s00107-011-0534-2.

6. Yi, X., Feng, A., Shao, W. & Xiao, Z. (2016). Synthesis and properties of graphene oxide-boron-modified phenolic resin composites. *High Performance Polymers*, 28 (5), 505-517. DOI: 10.1177/0954008315587953.

7. Wang, D.C., Chang, G.W. & Chen, Y. (2008). Preparation and thermal stability of boron-containing phenolic resin/clay nanocomposites. *Polymer Degradation and Stability*, 93 (1), 125-133. doi 10.1016/j.polymdegradstab.2007.10.021.

8. Korabel'nikov, D.V., Lenskii, M.A., Ozhogin, A.V., Nartov, A.S. & Anan'eva, E.S. (2016). A study of the modifying effect of additions of boric acid polymethylene-p-triphenyl ester in rubber-based polymer composites. Part 3. *International polymer science and technology*, 43(2), 11-14. DOI: 10.1177/0307174X160430020.

9. Androshchuk, A.A., Lenskii, M.A. & Belousov, A.M. (2011). The interaction of polyesters and polymethylene esters of phenols and boric acid with epoxy resin. *International Polymer Science and Technology*, 38(1), 33-36. DOI: 10.1177/0307174X1103800107.

10. Tribological Properties of Composites Based on a UHMWPE Modified Boropolymer / A.A. Okhlopova [et al.] // *Journal of Friction and Wear*. 2022. Vol. 43. № 1. P. 27-34. doi 10.3103/S1068366622010081.

11. Tuisov, A.G., Kychkin, A.A., Anan'eva, E.S. & Maksimova, E.M. (2020). Investigation of the process of boropolymer dissolution in epoxyanhydride binder. *Polzunovskiy vestnik*, (4), 117-120. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2020.04.022.

12. Nandiyanto, A.B.D., Oktiani, R. & Ragadhita, R. (2019). How to read and interpret FTIR spectroscopy of organic material. *Indonesian Journal of Science and Technology*, 4(1), 97-118. doi 10.17509/ijost.v4i1.15806.

13. Shurvell, H.F. & Faniran, J.A. (1968). Infra-red spectra of triphenylboron and triphenylborate.

Canadian Journal of Chemistry, 46(12), 2081-2087.

14. Li, B., Liu, D., Li, G. & Yang, X. (2018). Multi-fold interface and multilevel crack propagation mechanisms of graphene oxide/polyurethane/epoxy membranes interlaminar-toughened carbon fiber-reinforced polymer composites. *Journal of Materials Science*, 53, 15939-15951. DOI: 10.1007/s10853-018-2753-y.

15. Peacock, A.J. (2000). *Handbook of polyethylene: structures: properties, and applications*. Boca Raton: CRCpress, 544 p.

Information about the authors

S.N. Danilova - Junior Researcher of the Laboratory "Polymer Composites for the North", Institute of Natural Sciences, NEFU.

E.S. Efimova - 11th grade student of the "City Classical Gymnasium".

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

A.A. Okhlopova - Doctor of Technical Sciences, professor, Chief Researcher-Head of the educational, scientific and technological laboratory "Technologies of polymer nanocomposites named after S.A. Sleptsova", Institute of Natural Sciences, NEFU.

A.G. Tuisov - Candidate of Technical Sciences, Head Researcher of the Federal Research Centre "The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the RAS".

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.*

Статья поступила в редакцию 1 июня 2023; одобрена после рецензирования 29 февраля 2024; принята к публикации 05 марта 2024.

The article was received by the editorial board on 1 June 2023; approved after editing on 29 Feb 2024; accepted for publication on 05 Mar 2024.