

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-8-76-82>

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА С КОМБИНИРОВАННЫМ НАПОЛНЕНИЕМ

© Андрей Петрович Васильев¹, Сахаяна Николаевна Данилова^{1*},
Айталиа Алексеевна Охлопкова¹, Афанасий Алексеевич
Дьяконов^{1,2}, Анастасия Васильевна Оконешникова¹,
Игорь Сергеевич Макаров¹

¹ Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, Россия, 677000, Якутск, ул. Белинского, д. 58;
*e-mail: dsn.sakhayana@mail.ru

² Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН, Россия, 677000, Якутск, ул. Октябрьская, д. 1.

*Статья поступила 28 декабря 2022 г. Поступила после доработки 27 февраля 2023 г.
Принята к публикации 30 марта 2023 г.*

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) антифрикционного назначения с самосмазывающимися свойствами находят применение для изготовления различных деталей в узлах трения машин и механизмов. Цель работы — исследование влияния наполнителей (сульфенамида Ц, серы, оксидов магния и цинка) на трибологические параметры полимерных композиционных материалов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ). Образцы для исследований изготавливали методом горячего прессования — при температуре 175 °С и давлении 10 МПа. Рассматривали композиты с концентрациями наполнителей: 0,5 и 1 % масс. сульфенамида; 0,5 и 1 % масс. сульфенамида с серой; 0,5 и 1 % масс. сульфенамида с серой с вариацией оксида цинка или оксида магния. Установлено, что введение сульфенамида приводит к повышению износостойкости в шесть раз, а введение комбинации наполнителей 0,5 % масс. сульфенамида, серы и оксида магния — в 1,5 раза. Поверхности трения композитов исследовали на сканирующем электронном микроскопе и ИК-спектрометре. На поверхностях трения композитов, наполненных сульфенамидом, выявлено формирование ориентированной упорядоченной структуры в виде кластеров из продуктов износа. В случае комбинированного наполнения на поверхности трения обнаружены вторичные структуры, отличающиеся визуально от поверхности трения СВМПЭ. Методом ИК-спектроскопии поверхности трения композитов с комбинированным наполнением установлено появление пиков в ИК-спектрах, соответствующих кислородсодержащим группам (—C=O, —COOH). Показано, что ИК-спектры композитов с моно- и бинарными наполнителями имеют менее интенсивные пики благодаря формированию вторичных структур. Введение в СВМПЭ сульфенамида совместно с оксидами цинка и магния способствует сшивке макромолекул полимера в зоне трения за счет фрикционного нагрева, сдвиговых нагрузок и воздействия контртела. Разработанные материалы могут быть использованы для изготовления деталей узлов трения машин и другой транспортной техники, поскольку выдерживают жесткие условия эксплуатации в резкоконтинентальном климате.

Ключевые слова: сверхвысокомолекулярный полиэтилен; полимерный композиционный материал; комбинированное наполнение; сера; сульфенамид Ц; оксид цинка; оксид магния.

WEAR RESISTANCE OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON ULTRA-HIGH MOLECULAR POLYETHYLENE WITH COMBINED FILLING

© Andrey P. Vasilev,¹ Sakhayana N. Danilova,^{1*} Aitalina A. Okhlopova,¹
Afanasy A. Dyakonov,^{1,2} Anastasia V. Okoneshnikova,¹ Igor S. Makarov¹

¹ M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, 58, ul. Belinskogo, Yakutsk, 67700, Russia;
*e-mail: dsn.sakhayana@mail.ru

² V. P. Lariyonov Institute of the Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1, Oktyabrskaya ul., Yakutsk, 677000, Russia.

Received December 28, 2022. Revised February 27, 2023. Accepted March 30, 2023.

Polymer composite materials (PCM) of antifriction duty with self-lubricating properties are used for the manufacture of various parts in friction units of machines and mechanisms. PCM can partially replace parts made of metals and alloys, increasing the reliability and service life of the equipment when the use of oils or external lubricants is limited or prohibited. The goal of the study is the effect of fillers (sulfenamide, sulfur, magnesium and zinc oxides) on the tribological parameters of polymer composite materials based on ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE). Samples were prepared by hot pressing at a temperature of 175°C and a pressure of 10 MPa. Composites with filler concentrations 0.5 and 1 wt.% were considered (for sulfenamide, sulfenamide with sulfur, and combinations of 0.5 and 1 wt.% sulfenamide with sulfur and zinc oxide or magnesium oxide). It is shown that the introduction of sulfenamide leads to an increase in the wear resistance by six times, and the introduction of a combination of fillers of 0.5 wt.% sulfenamide, sulfur, and magnesium oxide — by 1.5 times. The friction surfaces of composites were studied using methods of scanning electron microscopy and IR-spectrometry. The formation of an oriented ordered structure in the form of clusters of wear products was revealed on the friction surfaces of composites filled with sulfenamide. In the case of combined filling, secondary structures were found on the friction surface, which visually differ from the UHMWPE friction surface. The appearance of peaks in IR spectra corresponding to oxygen-containing groups ($-C=O$, $-COOX$) was observed on the friction surface of composites with combined filling. It is shown that IR spectra of composites with mono- and binary fillers have peaks of less intensity due to the formation of secondary structures. The introduction of sulfenamide into UHMWPE, together with zinc and magnesium oxides, promotes the crosslinking of polymer macromolecules in the friction zone due to frictional heating, shear loads, and the action of a counterbody. The developed materials can be used as parts of friction units for cars and transport equipment that can withstand harsh operating conditions in a sharply continental climate.

Keywords: ultra-high molecular weight polyethylene; polymer composite material; combined filling; sulfur; sulfenamide; zinc oxide; magnesium oxide.

Введение

Создание новых конструкционных материалов из полимеров, обладающих высокой прочностью и износостойкостью, — перспективное направление в материаловедении [1]. Изделия из полимеров находят широкое применение в авиационной и ракетной промышленности, судостроении и машиностроении, строительной индустрии, медицине и других областях народного хозяйства [2]. Полимерные композиционные материалы (ПКМ) имеют низкую плотность, высокие модуль упругости и удельную прочность, конструкции и детали из них отличаются длительным сроком службы, по сравнению с металлами они легко перерабатываются в изделия сложной формы и с меньшим весом, что дополнительно упрощает технологический процесс [3].

В последние десятилетия сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) активно внедряется во все отрасли промышленности благодаря его уникальным свойствам [4]. СВМПЭ обладает высокими прочностью и химической стойкостью, износостойкостью и низким коэффициентом трения, что требуется для антифрикционных изделий [5]. Существуют различные способы модификации СВМПЭ, например, такие как введение наполнителей в матрицу [6], технологический метод изменения свойств полимерной основы путем обработки СВЧ и УЗ [7, 8], радиационное излучение [9], механоактивация [10]. Благодаря модификации достигаются требуемые эксплуатационные свойства материалов. Введение разного рода наполнителей в полимерную матрицу —

весьма эффективный способ изменения свойств для требуемых задач. Однако в ряде случаев использование указанных методов не приводит к достаточному улучшению комплекса физико-механических и трибологических свойств. Так, при введении наполнителя в матрицу может наблюдаться слабое межфазное взаимодействие между ними. Известно [11], что именно это взаимодействие отвечает за надежность полимерных композитов при их эксплуатации.

При разработке функциональных и конструкционных материалов одним из направлений является изготовление ПКМ с комбинированными наполнителями, отличающимися по химическим либо физическим свойствам. При правильном сочетании нескольких модификаторов можно получить композит с требуемыми свойствами. При комбинированном наполнении каждый компонент по-разному воздействует на полимерную матрицу [12], например, совместное наполнение ПТФЭ слоистыми силикатами и углеродным волокном позволяет повысить износостойкость композитов в 850 раз и прочность при сжатии — на 60 %.

В данной работе предложено для модификации СВМПЭ использовать комбинацию добавок органического модификатора сульфенамида Ц (CBS) совместно с серой и оксидами. Использование подобной комбинации наполнителей рассмотрено в работах [13 – 15], в которых исследована сшивка полиэтилена с помощью серы в присутствии 2-меркаптобензтиазола (МБТ), тетраметилтиурамдисульфида (ТМТД) и дифенилгуани-

дина (ДФГ). Авторы этих работ отмечают, что сшивка полиэтилена происходит с формированием сульфидных мостиков между макромолекулами. Ранее [16, 17] были приведены результаты исследования модифицирования СВМПЭ серой, дифенилгуанидином и 2-меркаптобензтиазолом и их смесями. Установлено, что модифицирование матрицы СВМПЭ серой и ДФГ приводит к увеличению предела прочности при растяжении. При использовании в качестве наполнителя МБТ наблюдалось повышение прочности и улучшение износостойкости с сохранением коэффициента трения. Улучшение износостойкости связано с формированием вторичных структур на поверхности трения ПКМ, с химической активностью МБТ.

В данной работе использовали сульфенамид Ц — на основе МБТ и имида о-фталевой кислоты, содержащей в своем составе ускоритель вулканизации и замедлитель подвулканизации [18]. В качестве армирующих элементов матрицы использовали оксиды цинка и магния как активаторы вулканизации в резиновых смесях.

Цель работы — исследование влияния серы, сульфенамида, а также оксидов цинка и магния на трибологические свойства и структуру поверхности трения ПКМ на основе СВМПЭ.

Материалы и методы исследования

Объекты исследования. В качестве полимерной матрицы использовали сверхвысокомолекулярный полиэтилен марки GUR 4022 производства фирмы Celanese (Китай) с молекулярной массой 5 млн г/моль и со средним размером частиц 155 мкм. Наполнителями служили компоненты, применяемые для вулканизации резины, такие как сульфенамид Ц (ТУ 113-03-469-80, $T_{пл} = 98,2\text{ }^{\circ}\text{C}$) — ускоритель замедленного действия; сера молотая (ГОСТ 127.4-93) — вулканизирующее вещество; оксид магния (ГОСТ 4526-75) и оксид цинка (ГОСТ 10262-73) — активаторы вулканизации и модифицирующие добавки для улучшения функциональных свойств резиновых изделий. Массовая концентрация

компонентов и их соотношение в СВМПЭ приведены в табл. 1.

Методы исследования. Компоненты ПКМ перемешивали в лопастном смесителе при скорости вращения ротора 1200 об/мин. Композиционную смесь обрабатывали методом горячего прессования на гидравлическом прессе ПКМВ-100 («Импульс», Россия) при температуре $175\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давлении 10 МПа в течение 20 мин, далее охлаждали до $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ под давлением. Из полученного материала изготавливали цилиндрические образцы диаметром $9,80 \pm 0,05\text{ мм}$ и высотой $20,0 \pm 1,0\text{ мм}$.

Для определения трибологических свойств ПКМ использовали трибометр UMT-3 (CETR, США). Испытания проводили при следующих условиях: удельная нагрузка 1,9 МПа; скорость скольжения 0,5 м/с; схема трения «палец — диск»; время испытания — 3 ч. В качестве контртела использовали стальной диск из стали 45 твердостью 45–50 HRC и шероховатостью $R_a = 0,06 - 0,08\text{ мкм}$. Плотность определяли методом гидростатического взвешивания согласно ГОСТ 15139. Массы ПКМ до и после изнашивания измеряли на аналитических весах Discovery DV215CD (OHAUS, Швейцария) с точностью до 0,00001 г.

Поверхность трения исследовали методами ИК-спектроскопии и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). ИК-спектры получали на спектрометре Varian 7000 FT-IR (Varian, США) с применением приставки нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО). Микрофотографии получали на электронном микроскопе JSM-7800F (Jeol, Япония) в режиме вторичных электронов при низком ускоряющем напряжении.

Результаты и их обсуждение

Установлено, что наполнение СВМПЭ функциональными модификаторами приводит к повышению износостойкости (табл. 2).

Анализ трибологических исследований показал, что введение в СВМПЭ только сульфенамида более увеличивает износостойкость исходного полимера, чем введение других композитов. Коэффициент трения всех ПКМ практически не из-

Таблица 1. Состав и соотношение компонентов в ПКМ
Table 1. Composition and ratio of the components in PCM

Компоненты, % масс.	Номер композита								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
СВМПЭ	100	99,5	99	98,5	98,5	99	98	97	97
Сульфенамид Ц	—	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1	1	1
Сера	—	—	0,5	0,5	0,5	—	1	1	1
Оксид цинка	—	—	—	0,5	—	—	—	1	—
Оксид магния	—	—	—	—	0,5	—	—	—	1

меняется относительно исходного образца. Установлено, что введение 0,5 % масс. и 1 % масс. CBS в исходный полимер снижает скорость массового изнашивания в шесть раз. При модификации полимерной матрицы комбинированными наполнителями (0,5 % масс.) трибологические свойства изменяются следующим образом: введение CBS с S приводит к повышению скорости массового изнашивания примерно на 16 %; если эти компоненты дополнены оксидами ZnO и MgO, наблюдается снижение скорости массового изнашивания примерно на 16 и 33 % соответственно.

Как видно из табл. 2, скорость массового изнашивания ПКМ при введении CBS с S в количестве 1 % масс. повышается на 50 % относительно данной характеристики исходного СВМПЭ. Для композитов, содержащих CBS и S с ZnO или MgO в СВМПЭ, значения скорости массового изнашивания увеличиваются на 75 % и 8 % соответственно.

Установлено, что введение модификаторов совместно с оксидами магния и цинка приводит к некоторому повышению плотности ПКМ, что согласуется с увеличением удельной массы композита при введении неорганических частиц. Так, плотность ПКМ с содержанием 1 % масс. комплекса с оксидом цинка составляет 0,964 г/см³, его скорость массового изнашивания несколько выше, чем исходного.

Повышение скорости массового изнашивания композитов, содержащих CBS и серу (0,5 % масс. и 1 % масс.), возможно, связано с тем, что при трении неровности стального контртела абразивно воздействуют на ПКМ. При введении в СВМПЭ оксидов с CBS и серой (0,5 % масс. и 1 % масс.) его износостойкость несколько улучшается. Возможно, относительно «мягкий» наполнитель сера, который распределяется между кристаллитами [16], слабо защищает поверхностный слой полимера в отличие от оксидов, кото-

рые в данном случае — сравнительно «твердый» наполнитель.

Для объяснения полученных результатов проведено исследование поверхности трения ПКМ методом сканирующей электронной микроскопии. На рис. 1 приведены морфологии поверхностей трения СВМПЭ и ПКМ. Видно, что поверхность трения исходного СВМПЭ отличается наличием бороздок, ориентированных вдоль пути трения (рис. 1, а). Бороздки на поверхности трения СВМПЭ образуются в результате пластической деформации матрицы с последующим нарастанием механических гистерезисных потерь в приповерхностном слое, происходит так называемый абразивный износ из-за шероховатой поверхности стального контртела (микрорезание выступами). Далее морфология поверхности трения СВМПЭ формируется за счет многократного повторения таких процессов, при этом образуется равновесная шероховатость поверхности трения, которая сильно отличается от исходной шероховатости контактирующих тел и не зависит от нее [19]. Композит, содержащий CBS, имеет менее заметные бороздки, на поверхности трения наблюдаются вторичные структуры с правильной геометрической формой, так называемые кластеры — из продуктов трибоокисления и модификатора (рис. 1, б, в). На поверхностях трения композитов с CBS, серой и оксидом цинка/оксидом магния не выявлены вторичные структуры с правильной геометрической формой. Видно, что вторичные структуры дискретно распределены по всей поверхности трения ПКМ.

Трибологические свойства композитов согласуются с морфологией поверхности трения. Так, ПКМ, наполненный серой и сульфенамидом (рис. 1, г, д), отличается наличием разрывов и частиц износа, что объясняет низкие значения износостойкости. Из рис. 1, е – и видно, что на поверхности трения ПКМ с тремя модификаторами наблюдаются скопления продуктов износа, со-

Таблица 2. Трибологические свойства и плотность ПКМ

Table 2. Tribological properties and density of PCM

Композит	Коэффициент трения f	Скорость массового изнашивания I_h , мг/ч	Плотность ρ , г/см ³
Исходный СВМПЭ	0,38 ± 0,01	0,12 ± 0,01	0,933
СВМПЭ + 0,5 % масс. CBS	0,40 ± 0,01	0,02 ± 0,02	0,945
СВМПЭ + 0,5 % масс. (CBS и S)	0,40 ± 0,01	0,14 ± 0,03	0,944
СВМПЭ + 0,5 % масс. (CBS, S и ZnO)	0,39 ± 0,01	0,10 ± 0,02	0,947
СВМПЭ + 0,5 % масс. (CBS, S и MgO)	0,39 ± 0,02	0,08 ± 0,02	0,944
СВМПЭ + 1 % масс. CBS	0,39 ± 0,01	0,02 ± 0,01	0,948
СВМПЭ + 1 % масс. (CBS и S)	0,39 ± 0,02	0,18 ± 0,02	0,947
СВМПЭ + 1 % масс. (CBS, S и ZnO)	0,42 ± 0,02	0,21 ± 0,03	0,964
СВМПЭ + 1 % масс. (CBS, S и MgO)	0,39 ± 0,02	0,13 ± 0,01	0,951

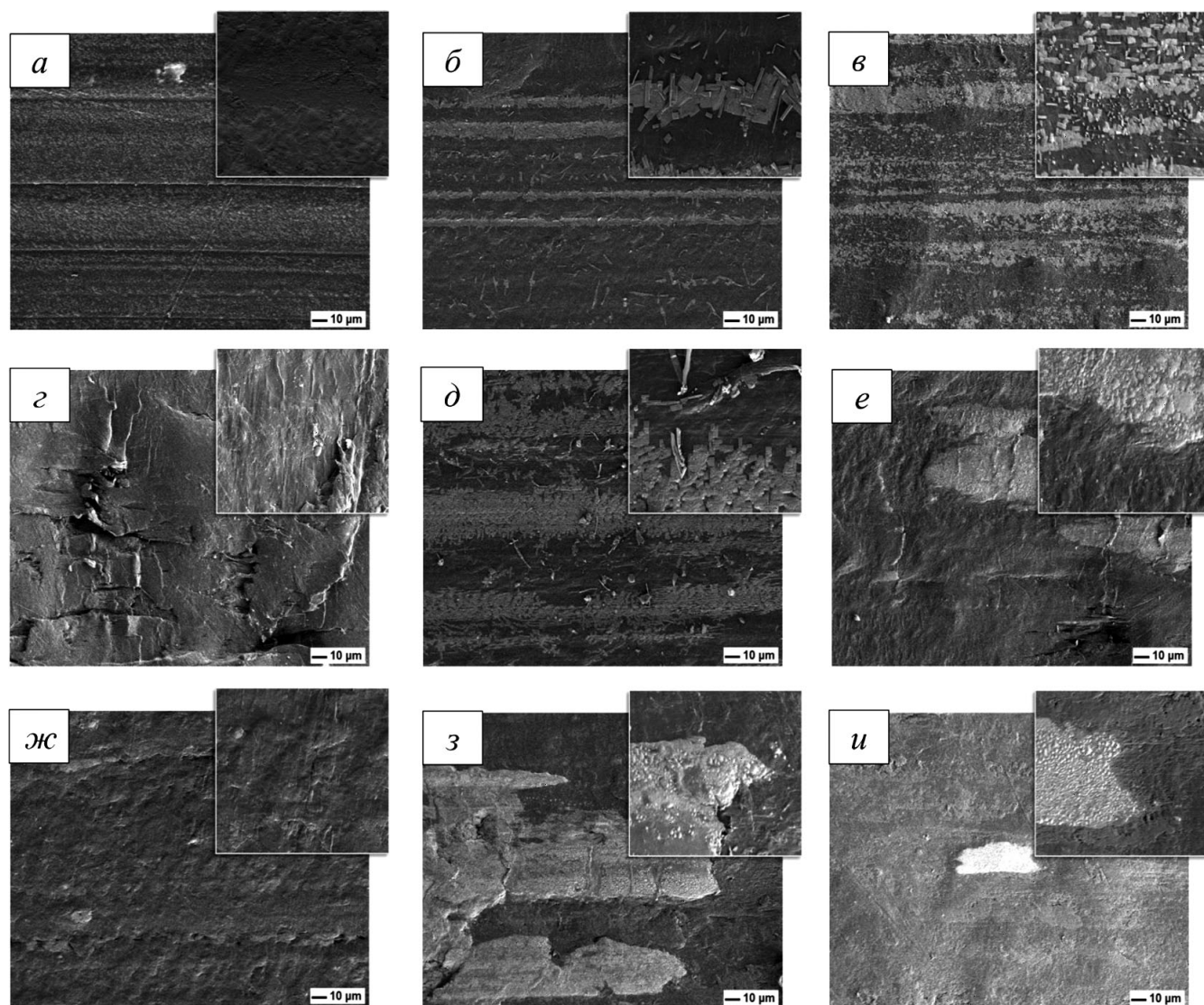


Рис. 1. Микрофотографии поверхностей трения исходного СВМПЭ (а) и композитов, содержащих 0,5 % масс. сульфенамида (б), 1 % масс. сульфенамида (в), 0,5 % масс. (сульфенамида и серы) (г); 1 % масс. (сульфенамида и серы) (д), 0,5 % масс. (сульфенамида, серы и оксида магния) (е), 1 % масс. (сульфенамида, серы и оксида магния) (ж), 0,5 % масс. (сульфенамида, серы и оксида цинка) (з), 0,5 % масс. (сульфенамида, серы и оксида цинка) (и)

Fig. 1. Micrographs of the friction surfaces of the initial UHMWPE (a) and composites containing: 0.5 wt.% SBC (b); 1 wt.% SBC (c); 0.5 wt.% (SBC and S) (d); 1 wt.% (SBC and S) (e); 0.5 wt.% (SBC, S, and magnesium oxide) (f); 1 wt.% (SBC, S, and magnesium oxide) (g); 0.5 wt.% (SBC, S, and zinc oxide) (h); 0.5 wt.% (SBC, S, and zinc oxide) (i)

стоящих из полимера и наполнителей, которые распределены дискретно и достаточно хорошо удерживаются макромолекулами полимера. Однако морфология поверхности трения этих композитов отличается большими неровностями и наличием наплывов, что свидетельствует о повышении температуры в зоне трения за счет наличия оксидов магния и цинка. Кроме того, одна из причин образования наплывов на поверхности трения ПКМ обусловлена деформационными процессами сдвига, в результате которого происходит пластическое вытеснение подповерхностного слоя материала.

На рис. 2 приведены ИК-спектры поверхностей трения ПКМ и СВМПЭ. Известно [6], что

ИК-спектр СВМПЭ характеризуется наличием сильных полос поглощения в областях 2900, 2845, 1480 и 720 см^{-1} , вызванных валентными и деформационными колебаниями $-\text{CH}_2$ связей, а также маятниковыми колебаниями полимерной цепи. СВМПЭ в процессе трения подвержен трибоокислению, что приводит к появлению полос поглощения кислородсодержащих групп, поэтому целесообразно рассмотреть ИК-спектры в диапазоне 2500 – 500 см^{-1} .

На ИК-спектрах поверхностей трения наблюдается полоса поглощения в области 1510 – 1770 см^{-1} , которая соответствует колебаниям карбонильных и карбоксильных соединений. На ИК-спектре композита с CBS интенсив-

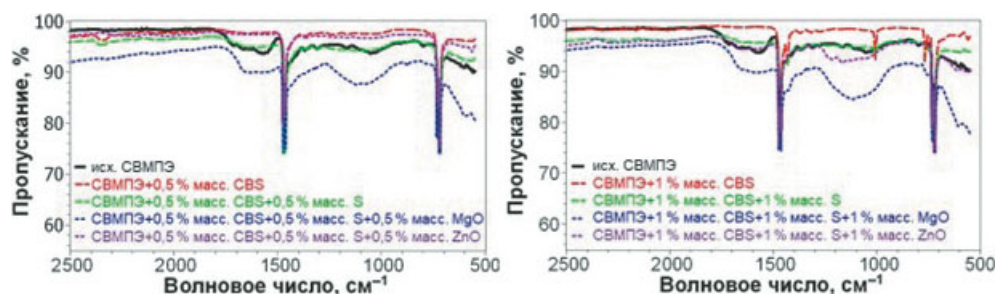


Рис. 2. ИК-спектры поверхностей трения СВМПЭ и композитов в зависимости от содержания наполнителей

Fig. 2. IR spectra of friction surfaces of UHMWPE and composites as a function of the content of fillers

ность полосы поглощения кислородсодержащих групп снижается, кроме того, появляются слабые пики при 754, 1012, 1238 и 1313 см^{-1} , соответствующие колебаниям связей ароматического кольца и гетероцикла органического модификатора. ИК-спектроскопическое исследование согласуется с результатами СЭМ, где выявлено формирование вторичных структур и трибопленки в зоне трения (см. рис. 1, б, в). Благодаря им снижается адгезионное взаимодействие между контактирующими телами и уменьшается скорость массового изнашивания.

Повышение интенсивности пиков и появление новых полос поглощения в области 920 – 1270 см^{-1} (колебания С–О связи в спиртах и в эфире) наблюдаются в ИК-спектре композита с комбинированным наполнителем MgO, что свидетельствует об интенсификации трибоокислительных процессов [20]. ИК-спектры остальных композитов идентичны исходному — СВМПЭ. Возможно, это связано с тем, что некоторая часть сульфенамида взаимодействует с серой и оксидом магния/цинка, поэтому трибопленка в основном состоит из продуктов трибоокисления ПКМ.

Заключение

Исследовано влияние функциональных модификаторов на трибологические свойства композитов на основе СВМПЭ. Полученные результаты трибологических свойств согласуются со структурными исследованиями поверхностей трения. На поверхности трения ПКМ, наполненных сульфенамидом, зафиксировано формирование сложных упорядоченных структур, отличных от исходной матрицы, которые снижают адгезионное взаимодействие и улучшают скольжение материала при трении. В случае бинарного и комбинированного наполнения матрицы СВМПЭ на поверхности трения в результате пластического вытеснения подповерхностного слоя формируются наплывы и разрывы. ИК-спектроскопией показано, что введение сульфенамида сопровождается снижением интенсивностей пиков, относящихся к окисленным продуктам трения

СВМПЭ, а комбинированное наполнение (добавление оксида магния) — уширением пиковой интенсивности этих соединений.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-73-00076.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зайдес С. А., Горбунов А. В. Определение глубины наклепанного слоя при центробежном обкатывании маложестких валов / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Т. 84. № 9. С. 64 – 71. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-9-64-71
2. Kolosov A. E., Sivetskii V. I., Kolosova E. P., et al. Creation of structural polymer composite materials for functional application using physicochemical modification / Adv. Polymer Technol. 2019. Vol. 2019. DOI: 10.1155/2019/3501456
3. Hsissou R., Seghiri R., Benzekri Z., et al. Polymer composite materials: A comprehensive review / Composite Struct. 2021. Vol. 262. P. 113640. DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.113640
4. Kurtz S. M. UHMWPE biomaterials handbook: ultra-high molecular weight polyethylene in total joint replacement and medical devices. — Academic Press, 2009. — 568 p.
5. Валуева М. И., Колобков А. С., Малаховский С. С. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен: рынок, свойства, направления применения (обзор) / Труды ВИАМ. 2020. № 3(87). С. 49 – 57. DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-3-49-57
6. Danilova S. N., Yarusova S. B., Kulchin Y. N., et al. UHMWPE/CaSiO₃ nanocomposite: Mechanical and tribological properties / Polymers. 2021. Vol. 13. N 4. P. 570. DOI: 10.3390/polym13040570
7. Маркевич И. А., Селютин Г. Е., Дрокин Н. А., Селютин А. Г. Электрофизические и механические свойства композита с повышенной диэлектрической проницаемостью на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена, модифицированного углеродными нанотрубками / Журнал технической физики. 2020. Т. 90. № 7. С. 1151 – 1158. DOI: 10.21883/JTF.2020.07.49450.391-19
8. Liang W., Xiaochun Y., Guangjian H., et al. Ultrasound-assisted melt mixing for the preparation of UHMWPE/OMMT nanocomposites / J. Thermoplastic Composite Mater. 2018. Vol. 31. N 6. P. 784 – 802. DOI: 10.1177/089270571772097
9. Bracco P., Bellare A., Bistolfi A., Affatato S. Ultra-high molecular weight polyethylene: influence of the chemical, physical and mechanical properties on the wear behavior. A review / Materials. 2017. Vol. 10. N 7. P. 791. DOI: 10.3390/ma10070791
10. Панин В. Е., Панин С. В., Корниенко Л. А. и др. Влияние механической активации сверхвысокомолекулярного полиэтилена на его механические и триботехнические свойства / Трение и износ. 2010. Т. 31. № 2. С. 168 – 176.
11. Дышин О. А., Габибов И. А., Шамилов В. М., Рустамова К. Б. Структура межфазных областей в полимерных на-

- нокомпозиатах / Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2019. № 3. С. 140 – 148. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.3.14
12. **Vasilev A. P., Struchkova T. S., Nikiforov L. A., et al.** Mechanical and tribological properties of polytetrafluoroethylene composites with carbon fiber and layered silicate fillers / *Molecules*. 2019. Vol. 24. N 2. P. 224. DOI: 10.3390/molecules24020224
 13. **Догадкин Б. А., Донцов А. А.** Взаимодействие полиэтилена с серой в присутствии меркаптобензотиазола и тетраметилтиурамдисульфида / *Высокомолекулярные соединения*. 1963. № 1. С. 1107 – 1117.
 14. **Догадкин Б. А., Донцов А. А.** Взаимодействие полиэтилена с серой / *Доклады Академии наук*. 1961. Т. 138. № 6. С. 1349 – 1352.
 15. **Карасева Ю. С., Башкатова Т. В., Черезова Е. Н., Хусайнов А. Д.** Исследование продуктов взаимодействия полиэтилена с серой в качестве вулканизирующих агентов / *Вестник Казанского технологического университета*. 2006. № 5. С. 57 – 62.
 16. **Дьяконов А. А., Данилова С. Н., Васильев А. П. и др.** Исследование влияния серы, дифенилгуанидина и 2-меркаптобензотиазола на физико-механические свойства и структуру сверхвысокомолекулярного полиэтилена / *Перспективные материалы*. 2020. № 1. С. 43 – 53. DOI: 10.30791/1028-978X-2020-1-43-53
 17. **Данилова С. Н., Дьяконов А. А., Васильев А. П. и др.** Исследование триботехнических свойств сверхвысокомолекулярного полиэтилена, наполненного серой, дифенилгуанидином и 2-меркаптобензотиазолом / *Вопросы материаловедения*. 2019. № 3. С. 91 – 98. DOI: 10.22349/1994-6716-2019-99-3-91-98
 18. Пат. SU 190557 A1 СССР, МПК С 08с. Способ вулканизации натурального и синтетических каучуков / *Фульдштейн М. С., Горелик М. В., Белова Л. Н., Певзнер Д. М.*; заявитель и патентообладатель Научно-исследовательский институт шинной промышленности. — № 1030643/23-5; заявл. 01.10.1965; опубл. 29.12.1966. Бюл. № 2.
 19. **Wang J., Yan F., Xue Q.** Friction and wear behavior of ultra-high molecular weight polyethylene sliding against GCr15 steel and electroless Ni — P alloy coating under the lubrication of seawater / *Tribol. Lett.* 2009. Vol. 35. N 2. P. 85 – 95. DOI: 10.1007/s11249-009-9435-5
 20. **Nandiyanto A. B. D., Oktiani R., Ragadhita R.** How to read and interpret FTIR spectroscopy of organic material / *Indonesian J. Sci. Technol.* 2019. Vol. 4. N 1. P. 97 – 118. DOI: 10.17509/ijost.v4i1.15806
 6. **Danilova S. N., Yarusova S. B., Kulchin Y. N., et al.** UHMWPE/CaSiO₃ nanocomposite: Mechanical and tribological properties / *Polymers*. 2021. Vol. 13. N 4. P. 570. DOI: 10.3390/polym13040570
 7. **Markevich I. A., Selyutin G. E., Drokin N. A., Selyutin A. G.** Electrical and mechanical properties of the high-permittivity ultra-high-molecular-weight polyethylene-based composite modified by carbon nanotubes / *Zh. Tekhn. Fiz.* 2020. Vol. 90. N 7. P. 1151 – 1158 [in Russian]. DOI: 10.21883/JTF.2020.07.49450.391-19
 8. **Liang W., Xiaochun Y., Guangjian H., et al.** Ultrasound-assisted melt mixing for the preparation of UHMWPE/OMMT nanocomposites / *J. Thermoplastic Composite Mater.* 2018. Vol. 31. N 6. P. 784 – 802. DOI: 10.1177/089270571772097
 9. **Bracco P., Bellare A., Bistolfi A., Affatato S.** Ultra-high molecular weight polyethylene: influence of the chemical, physical and mechanical properties on the wear behavior. A review / *Materials*. 2017. Vol. 10. N 7. P. 791. DOI: 10.3390/ma10070791
 10. **Panin V. E., Panin S. V., Kornienko L. A., et al.** Effect of mechanical activation of ultra-high-molecular-weight polyethylene on its mechanical and triboengineering properties / *Trenie Iznos*. 2010. Vol. 31. N 2. P. 168 – 176 [in Russian].
 11. **Dyshin O. A., Gabibov I. A., Shamilov V. M., Rustamova K. B.** The structure of interfacial regions in polymer nanocomposites / *Vestn. Perm. Nats. Issl. Politekh. Univ. Mekhanika*. 2019. N 3. P. 140 – 148 [in Russian]. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.3.14
 12. **Vasilev A. P., Struchkova T. S., Nikiforov L. A., et al.** Mechanical and tribological properties of polytetrafluoroethylene composites with carbon fiber and layered silicate fillers / *Molecules*. 2019. Vol. 24. N 2. P. 224. DOI: 10.3390/molecules24020224
 13. **Dogadkin B. A., Dontsov A. A.** Reaction of polyethylene with sulfur in the presence of mercaptobenzothiazole and tetramethylthiuram disulfide / *Vysokomol. Soed.* 1963. N 1. P. 1107 – 1117 [in Russian].
 14. **Dogadkin B. A., Dontsov A. A.** Interaction of polyethylene with sulfur / *Dokl. Akad. Nauk*. 1961. Vol. 138. N 6. P. 1349 – 1352 [in Russian].
 15. **Karaseva Yu. S., Bashkatova T. V., Cherezova E. N., Khusainov A. D.** Study of the products of the interaction of polyethylene with sulfur as vulcanizing agents / *Vestn. Kazan. Tekhnol. Univ.* 2006. N 5. P. 57 – 62 [in Russian].
 16. **D'yakonov A. A., Danilova S. N., Vasil'ev A. P., et al.** Study of sulfur, diphenylguanidine and 2-mercaptobenzothiazole effect on physical and mechanical properties and structure of ultra-high molecular weight polyethylene / *Perspekt. Mater.* 2020. N 1. P. 43 – 53 [in Russian]. DOI: 10.30791/1028-978X-2020-1-43-53
 17. **Danilova S. N., D'yakonov A. A., Vasil'ev A. P., et al.** Tribo-technical properties of ultra-high molecular weight polyethylene filled with sulfur, diphenylguanidine and 2-mercaptobenzothiazole / *Vopr. Materialoved.* 2019. N 3. P. 91 – 98 [in Russian]. DOI: 10.22349/1994-6716-2019-99-3-91-98
 18. Пат. SU 190557 A1 СССР, МПК S 08s. Method of vulcanization of natural and synthetic rubbers / *Ful'dshtejn M. S., Gorelik M. V., Belova L. N., Pevzner D. M.*; applicant NII shinnoi promyshlennosti. — N 1030643/23-5; appl. 10.01.1965; publ. 12.29.1966, Byull. N 2 [in Russian].
 19. **Wang J., Yan F., Xue Q.** Friction and wear behavior of ultra-high molecular weight polyethylene sliding against GCr15 steel and electroless Ni — P alloy coating under the lubrication of seawater / *Tribol. Lett.* 2009. Vol. 35. N 2. P. 85 – 95. DOI: 10.1007/s11249-009-9435-5
 20. **Nandiyanto A. B. D., Oktiani R., Ragadhita R.** How to read and interpret FTIR spectroscopy of organic material / *Indonesian J. Sci. Technol.* 2019. Vol. 4. N 1. P. 97 – 118. DOI: 10.17509/ijost.v4i1.15806

REFERENCES