

УДК 541.64:546.28

ВЛИЯНИЕ СВЕРХНИЗКОГО СОДЕРЖАНИЯ ГРАФЕНА НА ИЗНОСОСТОЙКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА

© 2023 г. А. С. Заболотнов^{а,*}, С. С. Гостев^а, М. В. Гудков^а,
Л. А. Новокшинова^а, Р. И. Челмодеев^б

^аФедеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук
119991 Москва, ул. Косыгина, 4, Россия

^бМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
105005 Москва, 2-я Бауманская ул., 5/1, Россия

*e-mail: zabolotnov.ru@gmail.com

Поступила в редакцию 17.04.2023 г.

После доработки 26.05.2023 г.

Принята к публикации 06.06.2023 г.

Методом полимеризации *in situ* получены композиты с содержанием графенового наполнителя в образцах от 0.014 до 0.05 мас. %. Исследовано влияние сверхнизкого содержания графена на комплекс износостойких и трибологических характеристик синтезированных композитов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена. Проведено исследование износостойкости синтезированных материалов при высокоскоростном воздействии водно-песчаной суспензии, износа в режиме микрорезания, фрикционной износостойкости. Также найдены значения коэффициента трения по стали. Введение графена в матрицу сверхвысокомолекулярного ПЭ приводит к увеличению стойкости к абразивному износу в режиме микрорезания, а также к увеличению стойкости к износу при воздействии водно-песчаной суспензии (износ по свободному абразиву).

DOI: 10.31857/S2308112023700517, EDN: MKKQVX

ВВЕДЕНИЕ

Сверхвысокомолекулярный полиэтилен является материалом, который обладает комплексом уникальных физико-механических и износостойких свойств. Полимер сочетает в себе высокие износостойкость при разных видах воздействия, сопротивление ударным нагрузкам, в том числе и при отрицательных температурах, радиационную и химическую стойкость, антиадгезионные свойства, а также низкий коэффициент трения скольжения. Материал имеет способность сохранять большинство своих качеств в широком интервале температур. Это определяет возможность применения сверхмолекулярного ПЭ в экстремальных условиях эксплуатации в различных отраслях промышленности [1–5].

Введение в полимерную матрицу функциональных неорганических наполнителей позволяет значительно повысить некоторые важные эксплуатационные характеристики сверхмолекулярного ПЭ, например износостойкость, жесткость, прочность, теплостойкость, снизить газопроницаемость и горючесть, а также придать новые функциональные свойства. Большое количество работ посвящено улучшению износостойкости

сверхмолекулярного ПЭ путем введения в его матрицу различных функциональных наполнителей, таких как карбид кремния [6, 7], цирконий [8, 9], дисульфид молибдена [10–13], базальтовое волокно [14], волластонит [15], каолин [16, 17], тальк [18, 19], аэросил [20], стекловолокно [21, 22]. Стоит отметить, что особым интересом у исследователей пользуются материалы с углеродными функциональными наполнителями различной природы: графит [23], углеродное волокно [24, 25], углеродные нанотрубки [26, 27], оксид графена [28–30]. К сожалению, большинство авторов не приводит сравнительную оценку износостойкости получаемых композиционных материалов в зависимости от разного вида воздействия на образцы. Такая комплексная оценка важна, поскольку при некоторых режимах эксплуатации изделия из сверхмолекулярного ПЭ подвержены сразу нескольким типам износа. Причем известно, что износостойкость одних и тех же композитов при разных механизмах износа может существенно различаться [31]. Представляется, что выбранный в качестве армирующего наполнителя графен при высвобождении в зоне трения будет играть роль твердой смазки, что

должно положительно сказаться на износостойкости материала.

Равномерность распределения армирующего наполнителя в полимерной матрице оказывает значительное влияние на трибологические свойства и износостойкость композиционных материалов при разных видах воздействия. Для получения композиционных материалов на основе сверхмолекулярного ПЭ в основном используются различные модификации метода сухого смешения порошков сверхмолекулярного ПЭ с наполнителями разной природы [10, 14, 15, 18]. Менее распространенный метод – синтез композитов в среде растворителя [6, 20, 32]. Полученные перечисленными методами композиционные материалы имеют сегрегированную структуру, в которой частицы наполнителя “опудривают” частицы сверхмолекулярного ПЭ, а между частицами наполнителя и сверхмолекулярного ПЭ нет химического взаимодействия. В связи с этим частицы наполнителя агломерируются, что приводит к снижению физико-механических свойств и износостойкости материала.

Для создания композитов на основе сверхмолекулярного ПЭ с равномерным распределением наполнителя в полимерной матрице наиболее эффективным является метод полимеризационного наполнения, согласно которому композиционный материал получают напрямую в реакторе. Суть данного метода заключается в нанесении на поверхность наполнителя и активации на ней металлорганического катализатора на основе $TiCl_4$ и/или VCl_4 . При полимеризации мономера полимер синтезируется непосредственно на каждой частице наполнителя в виде сплошного полимерного покрытия регулируемой толщины. В итоге получается композиционный материал, в котором все частицы наполнителя равномерно покрыты слоем сверхмолекулярного ПЭ. С применением метода полимеризационного наполнения были разработаны композиционные материалы на основе сверхмолекулярного ПЭ и наполнителей разного типа [16, 33–36], в том числе и с наполнителями нанометрового диапазона [33–36].

Ранее было показано положительное влияние сверхнизкой концентрации графена на комплекс физико-механических характеристик при растяжении. Наилучшим оказался образец с 0.026 мас. % графена, его прочность составляла 69 МПа, что является значительной характеристикой для композитов на основе полиолефинов. Такие высокие физико-механические характеристики должны способствовать улучшенному сопротивлению синтезированных композиционных материалов различным видам износа. В связи с этим цель настоящей работы – исследование влияния сверхнизких концентраций графена на комплекс износостойких и трибологических характеристик. Для

получения композитов с максимально улучшенным комплексом износостойких характеристик и более равномерным распределением наполнителя в матрице сверхмолекулярного ПЭ был выбран метод полимеризационного наполнения. Были приготовлены композиты с объемным содержанием графена от 0.0065 до 0.023% (0.014–0.05 мас. %). В данной статье приводятся результаты исследования трибологических свойств, а также исследования износостойкости синтезированных композитов при различных видах воздействия на образцы: фрикционный износ по стали, абразивный износ по наждачной бумаге, износ при высокоскоростном воздействии водно-песчаной суспензии.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве наполнителя применяли наночастицы графена, которые получали следующим образом: водную дисперсию оксида графена (предоставлена компанией “Graphene Technology”, Россия; подробный анализ приведен в работе [37]) с концентрацией 12 мг/мл, средним размером частиц 10–20 мкм, толщиной частиц 0.7 нм и соотношением C : O = 2.12 замораживали в жидком азоте в виде шариков диаметром 2–3 мм путем прикапывания из медицинского шприца. Замороженный образец лиофильно сушили, после чего полученный аэрогель из оксида графена подвергали восстановлению в вакууме при 450°C в течение 2 ч. В этом процессе образовался восстановленный оксид графена, который является графеном, имеющим структурные дефекты и остаточные кислородсодержащие группы на базальной плоскости [38]. Образец аэрогеля из восстановленного оксида графена имел удельную поверхность 215 м²/г и соотношение C : O = 11.8. Данный аэрогель в дальнейшем использовали для синтеза композитов.

Композиты на основе сверхмолекулярного ПЭ и графена получали методом полимеризационного наполнения (полимеризации *in situ*). Методика синтеза описана в работе [33]. Для исследования механических свойств получили серию образцов со сверхнизким содержанием графена от 0.0065 до 0.023 об. % (0.014–0.05 мас. %). Молекулярную массу полимерной матрицы для всех составов композиционного материала оценивали на основании характеристической вязкости раствора полимера по формуле Марголиса

$$\bar{M}_w = 5.37 \times 10^4 \times [\eta]^{1.49} \quad (1)$$

Вязкость полимеров определяли в декалине в среде инертного газа с помощью вискозиметра Уббелюде. На основе полученных результатов строили концентрационные зависимости вязкости раствора полимера и находили значение ха-

рактической вязкости. ММ исследованных образцов лежала в диапазоне $(3.8-4.3) \times 10^6$ г/моль [33, 39].

Образцы пластин для исследований получали методом горячего прессования порошков синтезированных композитов в пресс-форме закрытого типа на прессе марки Carver. Образцы прессовали при температуре $180 \pm 3^\circ\text{C}$ в течение 20 мин. Давление прессования составляло 10 МПа/см^2 и сохранялось при охлаждении образцов до температуры 20°C . Скорость охлаждения ~ 10 град/мин.

Коэффициент трения и износостойкость при трении по нержавеющей стали определяли на машине трения Т-01М (Институт устойчивых технологий, Польша) по схеме “палец–диск” в режиме сухого трения скольжения посредством вращения образца со скоростью 300 об/мин [40]. Использовали образцы радиусом 5 мм и толщиной 4 мм. Время испытания каждого образца составляло 8 ч при нагрузке на образец 50 Н и диаметре фрикционной дорожки на металлическом контртеле 50 мм. Металлическое контртело имело 8-й класс чистоты поверхности. Температура образца после испытания не превышала 70°C . Износ и коэффициент трения рассчитывали из пяти измерений, образец взвешивали до и после измерения его коэффициента трения; потеря веса служила мерой износа. Средняя ошибка измерений 11%.

Износостойкость немодифицированного сверхмолекулярного ПЭ и композитов на его основе при высокоскоростном воздействии водно-песчаных суспензий находили согласно ISO 15527. Образцы для испытания размером $80 \times 22 \times 6$ мм вырезали из заранее спрессованных пластин толщиной 6 мм. В качестве абразивного материала использовали молотый кварцевый песок с размером гранул 0.8–2.0 мм. Массовое соотношение абразива и воды равно 3 : 2. Скорость вращения образца в водно-песчаной суспензии 1200 об/мин, время испытания 3 ч.

Износостойкость при трении по наждачной бумаге определяли на приборе GT-7012-D в соответствии с ГОСТ 11012. Образцы цилиндрической формы диаметром 16 мм вырезали из спрессованных пластин толщиной 6 мм. Испытания проводили по наждачной бумаге КК511Х Р60 с размером абразивных частиц 250–397 мкм при прижимном усилии 10 Н. Во время испытания образец вращался вокруг своей оси и смещался на новую поверхность наждачной бумаги, длина пути составляла 40 м. Чтобы избежать засаливания и снижения режущей способности наждачной бумаги после каждого измерения ее очищали путем прохождения образца вакуумной резины, оставшиеся частицы износа на наждачной бумаге удаляли полипропиленовой щеткой. За результат

принимали среднее значение из десяти испытанных образцов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимость износостойкости композитов при воздействии водно-песчаной суспензии представлена на рис. 1. Для сравнения также приведены результаты оценки износостойкости чистых коммерческих марок сверхмолекулярного ПЭ со схожей ММ: GUR 4120 – 4.5×10^6 г/моль, Lupolen UHM – 5×10^6 г/моль, а также результаты, испытаний немодифицированного сверхмолекулярного ПЭ (сверхмолекулярный ПЭ чистый), полученного на аналогичных каталитических комплексах. Результаты показывают, что включение армирующего наполнителя в синтезированные композиционные материалы значительно увеличивает их износостойкость по данному виду воздействия на образцы. Потеря массы при износе немодифицированного сверхмолекулярного ПЭ, синтезированного на каталитической системе, аналогичной применяемой для получения композитов, составила 0.745 г, в то время как потеря массы композиционного материала на основе сверхмолекулярного ПЭ, содержащего 0.014 мас. % графена, равна 0.340 г. Дальнейшее увеличение содержания графена в композите приводит к незначительному ухудшению износостойкости. Потеря массы образца, содержащего 0.05 мас. % графена, составила 0.410 г. По-видимому, некоторое снижение износостойкости при увеличении содержания графена в образцах связано с особенностями метода исследования. При данном типе износа исследуемый образец постоянно “бомбардируется” частицами песка в хаотичном порядке. При повышении концентрации армирующего компонента в матрице полимера возрастает вероятность его “выбивания” из полимерной матрицы.

В то же время образцы при водно-песчаном износе подвергаются постоянному сжимающе-растягивающему воздействию. При таком воздействии все синтезированные композиты показали практически двукратное увеличение износостойкости по сравнению с ненаполненными образцами сверхмолекулярного ПЭ. Потеря массы для образцов ненаполненного сверхмолекулярного полиэтилена GUR 4120, Lupolen UHM и собственного чистого сверхмолекулярного ПЭ составила 0.65, 0.68, 0.74 г соответственно, что существенно выше значений полученных нами композиционных материалов. Ранее было установлено, что введение графеновых частиц в матрицу сверхмолекулярного ПЭ приводит к возрастанию предела прочности при разрыве синтезированных композитов на 30% по сравнению с ненаполненным сверхмолекулярным ПЭ. По всей видимости, увеличенная разрывная проч-

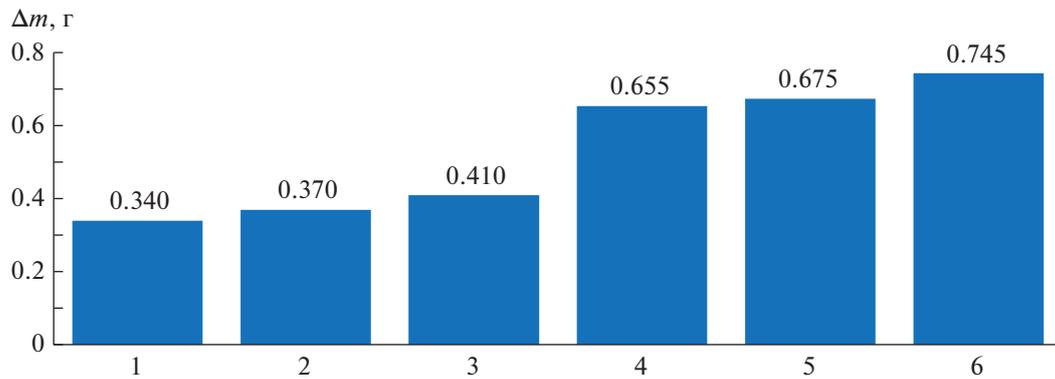


Рис. 1. Сравнительная износостойкость композиционных материалов при воздействии высокоскоростной водно-песчаной суспензии. Здесь и на рис. 2 и 3: 1 – сверхмолекулярный ПЭ-графен 0.014 мас. %; 2 – сверхмолекулярный ПЭ-графен 0.026 мас. %; 3 – сверхмолекулярный ПЭ-графен 0.05 мас. %; 4 – Lupolen UHM; 5 – Gur 4120; 6 – чистый сверхмолекулярный ПЭ. Цветные рисунки можно посмотреть в электронной версии.

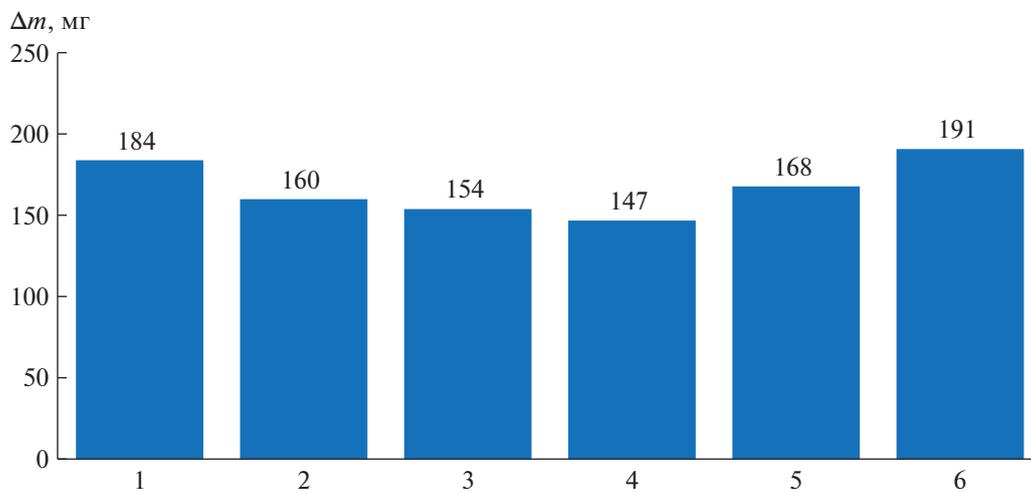


Рис. 2. Сравнительная износостойкость композиционных материалов при износе по наждачной бумаге.

ность позволяет композитам более эффективно сопротивляться износу с постоянными сжимающе-растягивающими нагрузками.

Помимо износостойкости при воздействии водно-песчаной суспензии важное значение имеет способность композита противостоять износу в режиме микрорезания. На рис. 2 отображены результаты исследования износа по наждачной бумаге синтезированных композитов с содержанием графеновых частиц от 0.014 до 0.05 мас. %, немодифицированного сверхмолекулярного ПЭ, а также коммерческих марок сверхмолекулярного ПЭ. Установлено, что введение графенового наполнителя в матрицу сверхмолекулярного ПЭ улучшает стойкость материалов к износу в режиме микрорезания. Так, средняя потеря массы немодифицированного сверхмолекулярного ПЭ в ходе испытания составила 191 мг, в то время как аналогичный показатель для композиционного

материала с содержанием графена 0.05 мас. % снизился до 154 мг. Как известно, углеродные наполнители являются твердой смазкой в различных трибосистемах. При истирании образца наждачной бумагой на ее зернах образуется тонкая пленка из графеновых частиц, которая способствует более “щадящему” передвижению абразивных зерен по матрице композита. В данном случае наполнитель работает как твердая смазка. Из-за проскальзывания абразивных зерен в матрице композита наблюдается прямая концентрационная зависимость износостойкости от количества введенного графена: чем выше концентрация графеновых частиц, тем лучше композиционный материал противостоит износу. Кроме того, наполнитель улучшает микротвердость полиэтиленовой матрицы, препятствуя углублению режущих зерен наждачной бумаги в испытываемый

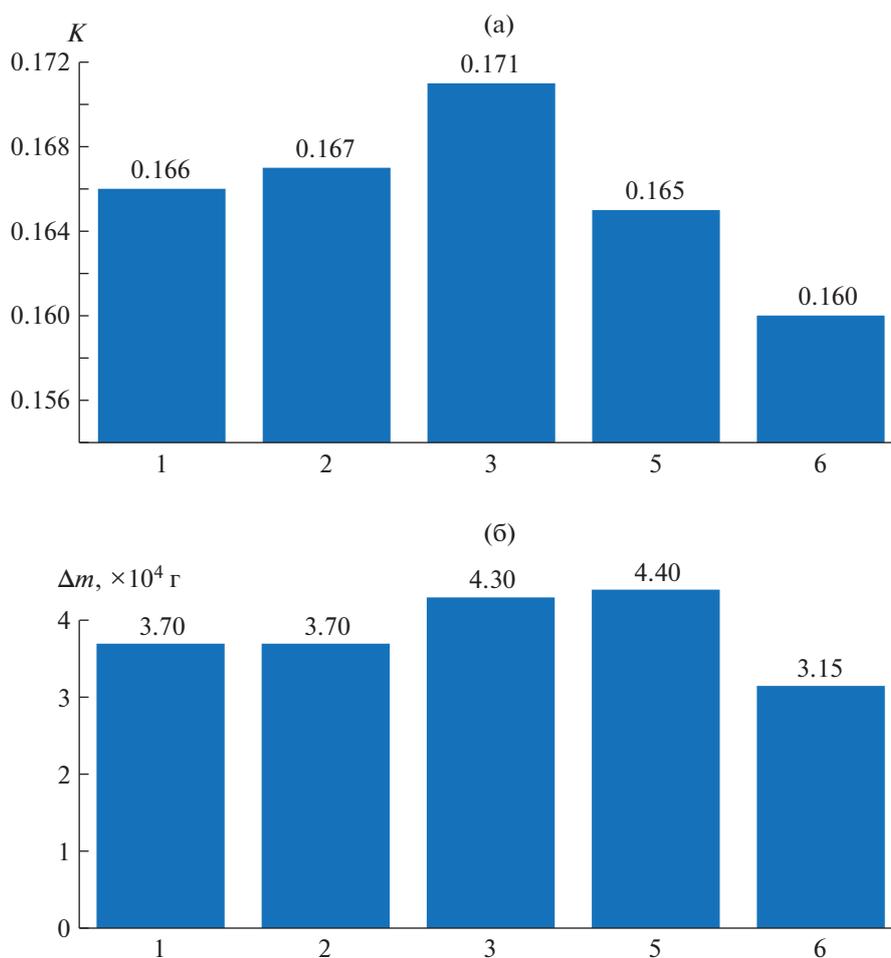


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения K от концентрации графена в синтезированных композитах сверхмолекулярного ПЭ (а) и концентрационная зависимость износостойкости синтезированных композитов сверхмолекулярного ПЭ при трении по стали (б).

образец, что также способствует снижению износа в режиме микрорезания.

На рис. 3 представлены результаты трибологических исследований синтезированных композитов, а также немодифицированного и коммерческого сверхмолекулярного ПЭ при трении по стали. Было показано, что введение графена в матрицу сверхмолекулярного ПЭ приводит к ухудшению стойкости к износу по стали и росту коэффициента трения. Потеря массы образца немодифицированного сверхмолекулярного ПЭ после испытания составила 315 мкг, его коэффициент трения равен 0.160. При введении 0.014 мас. % графена в матрицу сверхмолекулярного ПЭ повышается показатель износа до 370 мкг и увеличивается коэффициент трения до 0.166. Дальнейшее повышение содержания графитовых частиц в композите способствует еще большему ухудшению износостойкости и увеличению коэффициента трения. Так, композит с 0.05 мас. % графена изнашивался на 340 мкг, что на 36% выше чистого

сверхмолекулярного ПЭ и показал наибольший коэффициент трения равный 0.171. Вероятно, сверхнизкие концентрации графена в композиционных материалах, исследуемых в рамках данной работы, не позволяют образовывать устойчивую пленку переноса на границе разделов фаз металл–композит. При отделении пленки переноса от тел на границе трибосопряжения графеновые частицы будут дополнительным абразивом. Чем больше концентрация графена в матрице, тем выше концентрация третичного абразива на границе трения скольжения, а увеличение концентрации третичного абразива напрямую влияет на износостойкость системы. По-видимому, в этом случае проявляется так называемый трехтельный износ [41]. Однако для подтверждения данного предположения требуется проведение дополнительных исследований.

При сравнении полученных при исследовании показателей износа по стали и коэффициента трения композиционных материалов на основе

графена, немодифицированного сверхмолекулярного ПЭ и коммерческого образца сверхмолекулярного ПЭ GUR 4120 обнаружено, что промышленный образец сверхмолекулярного ПЭ имеет несколько более высокий коэффициент трения, при этом его износостойкость по стали значительно уступает чистому сверхмолекулярному ПЭ, синтезированному в настоящей работе. Из данных, предоставленных компанией-производителем материала GUR 4120, известно, что данный материал содержит в своем составе процессинговые добавки на основе стеаратов металлов, а также пространственно-затрудненные фенолы в качестве термостабилизаторов. Влияние этих добавок при трении по стали ранее изучали недостаточно, хотя и можно сделать предположение об их отрицательном влиянии на износостойкость коммерческого сверхмолекулярного ПЭ.

Исходя из полученных данных можно сделать вывод, что введение сверхнизких концентраций графена в матрицу сверхмолекулярного ПЭ методом полимеризационного наполнения позволяет получить материалы с улучшенными показателями износостойкости по стали при сохранении коэффициента трения на уровне коммерческого сверхмолекулярного ПЭ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно результатам исследования износостойкости синтезированных композиционных материалов методом полимеризационного наполнения при сверхнизкой концентрации графена и различном виде воздействия на них, установлено, что введение малого количества армирующего наполнителя способствует значительному повышению износостойкости материалов при высокоскоростном воздействии водно-песчаной суспензии, а также в режиме микрорезания. Модификация сверхмолекулярного ПЭ графеновым наполнителем приводит к некоторому снижению стойкости к износу по стали и повышению коэффициента трения, вероятно, из-за явления трехтельного износа. В то же время синтезированный композиционный материал с содержанием графена 0.026 мас. % демонстрирует существенно более высокую износостойкость по стали и песку относительно коммерческих марок сверхмолекулярного ПЭ, причем коэффициент трения данного образца практически равен аналогичному показателю для материала GUR 4120. При промышленной эксплуатации на композиционные материалы одновременно и постоянно действуют несколько видов износа. Именно поэтому при разработке композиционных материалов необходимо исследовать их на противодействие разным механизмам износа. Такие исследования помогают выбрать материал с наилучшей комплексной износоустойчивостью.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 22-23-20018).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Андреева И.Н., Веселовская Е.В., Наливайко Е.И.* Сверхвысокомолекулярный полиэтилен высокой плотности. Л.: Химия, 1982.
2. *Галицын В.П.* Дис. ... д-ра хим. наук. М.: ВНИИСВ, 2012.
3. *Май Ю., Жонг-Жен Ю.* Полимерные наноконпози-ты. М.: Техносфера, 2011.
4. *Zhen J., Han Y., Zhu L.* // Tribol. Int. 2023. V 179. P. 108097.
5. *Hussain M., Naqvi R.A., Naseem Abbas N.* // Polymers. 2020. V. 323. № 12(2). P. 1.
6. *Sharma S., Bijwe J., Panier S.* // Wear. 2015. V. P. 332.
7. *Aliyu I.K., Azam M.U., Lawal D.U.* // Arab. J. Sci. Eng. 2019. № 45. P. 849.
8. *Plumlee K., Schwartz C.J.* // Wear. 2009. V. 267. P. 710.
9. *Rodrigues M.M., Fontoura C.P., Maddalozzo A.E.* // Composites. 2020. № 189. P. 1.
10. *Panin S.V., Kornienko L.A., Nguen T.* // J. Friction Wear. 2014. V. 35. № 4. P. 444.
11. *Pettarin V., Churruca M.G., Felhos D.* // Wear. 2010. V. 269. P. 31.
12. *Zhen J., Han Y., Zhu L.* // Tribol. Int. 2023. V. 179. P. 108097.
13. *Guezmil M., Bensalah W., Mezlini. S.* // Mater. Res. Express. 2019. V. 6. № 7. P. 1.
14. *Gogoleva O.V., Petrova P.N., Popov S.N.* // J. Friction Wear. 2015. V. 36. № 4. P. 301.
15. *Tong J., Ma Y., Arnell R.D., Ren L.* // Composites A. 2006. V. 37. P. 38.
16. *Новокушонова Л.А., Мешкова И.Н.* // Высокомолек. соед. 1994. Т. 36. № 4. С. 629.
17. *Yusrina M.D., Tan W.S.* // Proc. Adv. Mater., Eng. Technol. 2020. V. 2291. P. 020029-1.
18. *Chang B.P., Akil H.M., Nasir R.B.* // Tribol. Int. 2015. V. 88. P. 252.
19. *Chang B.P., Akil H.M., MD Nasir R.B.* // Sains Malay-siana. 2015. V. 44. № 6. P. 819.
20. *Aderikha V. N., Shapovalov V. A., Krasnov A.P.* // Composites. 2008. V. 29. № 4. P. 318.
21. *Panin S.V., Buslovich D.G., Dontsov Y.V.* // Materials. 2021. V. 14. № 1515. P. 1.
22. *Wang Y., Yin Z.* // Ind. Lubr. Tribol. 2019. V. 71. P. 22.
23. *Panin S.V., Kornienko L.A., Ivanova L.R.* // J. Friction Wear. 2014. V. 35. № 4. P. 290.
24. *Wood W.J., Maguire R.G., Zhong W.H.* // Composites B. 2011. V. 42. P. 584.
25. *Panin S.V., Kornienko L.A., Alexenko V.O.* // Materials. 2020. V. 13. P. 338.
26. *Samad M.A., Sinha S.K.* // Tribol. Int. 2011. V. 44. P. 1932.
27. *Diabb J.M., Leija Guti'erez H.M., C'ardenas E.S.* // J. Mech. Behav. Biomed. Maters. 2021. V. 120. P. 104554.

28. *Yingfei An, Tai Z., Yingfei Y.Q.* // J. Appl. Polym. Sci. 2014. № 39640. P. 1.
29. *Pang W., Jialiang W.P., Zhang W.Q.* // RSC Adv. 2017. V. 7. P. 55536.
30. *Chen X., Zhang S., Zhang L.* // Polymers. 2021. V. 13. P. 482.
31. *Фарберова И.И., Ратнер С.Б., Лурье Е.Г.* // Пласт. массы. 1962. № 9. С. 35.
32. *Tai Z., Chen Y., An Y.* // Tribol Lett. 2012. V. 46. P. 55.
33. *Brevnov P.N., Kirsankina G.R., Zabolotnov A.S., Krasheninnikov V.G., Grinev V.G., Berezkina N.G., Sinevich E.A., Shcherbina M.A., Novokshonova L.A.* // Polymer Science C. 2016. V. 58. № 1. P. 38.
34. *Park H.-J., Kwak S.-Y., Kwak S.* // Macromol. Chem. Phys. 2005. V. 206. P. 945.
35. *Nazarov V.G., Stolyarov V.P., Doronin F.A., Evdokimov A.G., Rytikov G.O., Brevnov P.N., Zabolotnov A.S., Novokshonova L.A., Berlin A.A.* // Polymer Science A. 2019. V. 61. № 3. P. 325.
36. *Ryvkina N.G., Nezhnyni P.A., Kudinova O.I.* // Russ. J. Phys. Chem. B. 2019. V. 13. № 5. P. 831.
37. *Shiyanova K.A., Gudkov M.V., Gorenberg A.Y.* // ACS Omega. 2020. № 5. V. 39. P. 25148.
38. *Pei S., Cheng H.M.* // Carbon. 2012. V. 50. № 9. P. 3210.
39. *Brevnov P.N., Zabolotnov A.S., Krasheninnikov V.G.* // Kinet. Catal. 2016. V. 57. № 4. P. 482.
40. *Teplov A.A., Tribological S.I., Belousov E.A.* // Crystallogr. Rep. 2021. V. 66. № 6. P. 883.
41. *Kovaříková I., Szewczyková B., Blaškovič P.* // Mater. Sci. Technol. 2009. V. 1. P. 1.