



Научная статья
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)
УДК 678.073

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.032



ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ И СТРУКТУРЫ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА И ЕГО КОМПОЗИТА В ПРОЦЕССЕ НАТУРНОЙ ЭКСПОЗИЦИИ В УСЛОВИЯХ ЯКУТИИ

Ольга Владимировна Гоголева ¹, Павлина Николаевна Петрова ²,
Андрей Леонидович Федоров ³

^{1, 2, 3} Федеральный исследовательский центр "Якутский научный центр СО РАН", обособленное подразделение
Институт проблем нефти и газа СО РАН, 677007, г. Якутск, Россия

¹ oli-gogoleva@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5425-2295>

² ppavlina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1859-8034>

³ gelvirb@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1718-2643>

Аннотация. В данной статье приведены результаты исследования свойств образцов СВМПЭ (сверхвысокомолекулярного полиэтилена), композитов с углеродными волокнами и композитов с УВ, модифицированных стабилизатором СО-4, дополненные данными натурного экспонирования до 18 месяцев на открытом стенде полигона климатических испытаний «Якутск».

Выявлено, что у стабилизированных полимерных композиционных материалов (ПКМ) значения степеней кристалличности практически остаются неизменными. По данным ИК-исследований процесс образования винильных групп происходит как на поверхности, так и в подповерхностных слоях композита на глубину до 200 мкм, не затрагивая основной объем полимерной матрицы.

В процессе трения экспонированных образцов СВМПЭ и стабилизированного ПКМ в первую очередь изнашивается деградированный (состаренный) поверхностный слой, причем степень износа зависит от глубины фотохимической деструкции.

Установлено, что добавление стабилизатора марки СО-4 в количестве 0,5 мас. % к композиту СВМПЭ-УВ замедляет процессы старения на открытом воздухе. Это, в свою очередь, положительно сказывается на физико-механических характеристиках и износостойкости материала на протяжении длительного времени при воздействии неблагоприятных климатических условий Якутии.

Ключевые слова: сверхвысокомолекулярный полиэтилен, стабилизатор, атмосферостойкость, деградированный слой, деструкция, натурная экспозиция.

Благодарности. Работа выполнена в рамках Госзадания Министерства науки и высшего образования РФ №122011100162-9 с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Для цитирования: Гоголева О. В., Петрова П. Н., Федоров А. Л. Исследование изменения свойств и структуры сверхвысокомолекулярного полиэтилена и его композита в процессе натурной экспозиции в условиях Якутии // Ползуновский вестник. 2025. № 2, С. 207–213. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.02.032. EDN: <https://elibrary.ru/XJHSLF>.

Original article

INVESTIGATION OF CHANGES IN PROPERTIES AND STRUCTURE OF ULTRA-HIGH MOLECULAR WEIGHT POLYETHYLENE AND ITS COMPOSITE DURING FULL-SCALE EXPOSURE IN YAKUTIA

Olga V. Gogoleva ¹, Pavlina N. Petrova ², Andrey L. Fedorov ³

^{1, 2, 3, 4} Federal Research Center "Yakutsk Scientific Center SB RAS", a separate division of the Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, 677007, Yakutsk, Russia

¹ oli-gogoleva@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5425-2295>

² ppavlina@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1859-8034>

³ gelvirb@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1718-2643>

Abstract. This article presents the results of a study of the properties of UHMWPE samples, carbon fiber composites and HC composites modified with a CO-4 stabilizer, supplemented with data from full-scale exposure for up to 18 months at the open stand of the Yakutsk climatic testing range.

© Гоголева О. В., Петрова П. Н., Федоров А. Л., 2025

It was found that the crystallinity degrees of stabilized polymer composite materials (PCM) remain virtually unchanged. According to IR studies, the formation of vinyl groups occurs both on the surface and in the subsurface layers of the composite to a depth of 200 μm , without affecting the bulk of the polymer matrix.

During friction of exposed UHMWPE and stabilized PCM samples, the degraded (aged) surface layer wears out first, with the degree of wear depending on the depth of photochemical destruction.

It was found that adding 0.5 wt. % of the CO-4 stabilizer % to the UHMWPE-UV composite slows down the aging process in the open air. This, in turn, has a positive effect on the physical and mechanical characteristics and wear resistance of the material over a long period of time when exposed to the unfavorable climatic conditions of Yakutia.

Keywords: ultrahigh molecular weight polyethylene, stabilizer, weather resistance, degraded layer, destruction, full-scale exposure.

Acknowledgements. The work was carried out within the framework of the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation No. 122011100162-9 using scientific equipment of the Center for Collective Use of the FRC Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Gogoleva, O. V., Petrova, P. N. & Fedorov, A. L. (2025). Investigation of changes in properties and structure of ultra-high molecular weight polyethylene and its composite during full-scale exposure in Yakutia *Polzunovskiy vestnik*, (2), 207-213. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.02.032. EDN: <https://elibrary.ru/XJHSLF>.

ВВЕДЕНИЕ

Полимерные композиционные материалы на основе СВМПЭ широко применяются в различных отраслях благодаря таким характеристикам, как малая плотность, износостойкость, устойчивость к обледенению, гидрофобность, химическая стойкость и ударопрочность. Композиционные материалы на основе СВМПЭ применяются для облицовки бункеров, кузовов самосвалов, вагонов и конструкций в горнорудной промышленности, в деталях и элементах конструкций, подверженных ударной нагрузке или истиранию в машиностроении. Применяют также в фильтрах для работы в агрессивных средах в пищевой и химической промышленности, в тонкослойных антикоррозионных покрытиях металлических контейнеров и изделий, в морозостойких композиционных материалах для уплотнительных резинотехнических изделий [1–5].

Для успешного применения композиционных материалов на основе СВМПЭ в качестве футеровки, защитных покрытий необходимо изучение не только механических и триботехнических показателей, также следует изучить их атмосферостойкость в регионе возможного применения. Ранее проведенные исследования атмосферостойкости СВМПЭ и композитов на его основе с углеродными волокнами (УВ) марки Белум показали, что при натурной экспозиции в условиях г. Якутска под действием света, кислорода, влажности, перепада температур они подвергаются в основном световому старению, приводящим к фотохимической деструкции полимерных цепей или их нежелательному, неконтролируемому сшиванию, в результате чего в течение 3–6 месяцев они становятся хрупкими и жесткими. Показано, что у образцов СВМПЭ на 135 день экспонирования зарегистрирован резкий спад эластичности, происходит хрупкое разрушение образца. Резкий спад относительного удлинения у нестабилизированного композита зарегистрирован на 105 день экспонирования. Установлено, что относительное удлинение при разрыве композита, дополнительно модифицированного 0,5 мас. % стабилизатора СО-4, после 15 дней экспонирования увеличивается на 10 % и далее это значение сохраняется в течение 9 месяцев [6].

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве полимерной матрицы был выбран СВМПЭ марки Gur-4150 (Celanese, Китай). В качестве армирующего наполнителя использованы дискретные углеродные волокна (УВ) марки «Белум» (ОАО «Светлогорск Химволокно», Беларусь). В качестве противостарителя был выбран стабилизатор марки СО-4 (НИОХ СО РАН, Россия).

208

Переработка сверхвысокомолекулярного полиэтилена и полимерных композиционных материалов на его основе проводилась с использованием технологии компрессионного спекания при режиме: давление 10 МПа, температура 180 °С, время выдержки 20 мин.

Предел прочности при растяжении, относительное удлинение при разрыве определяли по ГОСТ 11262-2017 на испытательной машине «UTS-20K». Скорость массового изнашивания оценивали по потере массы образцов в единицу времени на машине трения ИИ-5018 по схеме «палец-диск» при нагрузке 200 Н, линейной скорости скольжения 0,5 м/с и времени испытания 3 ч. ИК-спектры образцов регистрировали на спектрометре Varian FTIR 7000 Spectrometer в области частот 400–4000 cm^{-1} с приставкой нарушенного полного внутреннего отражения. Идентификацию и анализ ИК-спектров осуществляли по известным методикам с использованием библиотеки спектрометра и данных по ИК-спектрам полимеров.

Образцы после определенных периодов экспонирования исследовали методом дифференциальной сканирующей калориметрии на приборе NETZSCH DSC 204 HP Phoenix. Образцами служили вырезанные из экспонированных образцов, параллелепипеды, размерами примерно 3,5х3,5х1,5 мм, массой 20±1 мг. В качестве тиглей использовали алюминиевые тигли с крышками. Нагрев осуществлялся со скоростью 20°/мин, при постоянной продувке измерительной ячейки калориметра газообразным азотом со скоростью потока 30 мл/мин. Перед измерением образцов была проведена высокоточная (расширенная) калибровка прибора по температуре и теплоте, при вышеперечисленных условиях испытаний с использованием эталонов (индий, олово, цинк, висмут), которая обеспечивает достижение точности по температуре лучше, чем ±0,3К, по теплоте лучше, чем ±0,5%, согласно ГОСТ 55134-2012.

Исследование изменения основных свойств композитов при естественном старении в климатических условиях г. Якутска проводили по ГОСТ 9.708-83. Экспонирование выполнялось на открытой площадке испытательного полигона Института проблем нефти и газа СО РАН.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В данной статье приведены результаты исследования свойств образцов СВМПЭ, композитов с углеродными волокнами и композитов с УВ, модифицированных стабилизатором СО-4, дополненные данными экспонирования до 18 месяцев на открытом стенде полигона климатических испытаний «Якутск». На рисунках 1 и 2 приведены зависимости относительного

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2 2025

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ И СТРУКТУРЫ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА И ЕГО КОМПОЗИТА В ПРОЦЕССЕ НАТУРНОЙ ЭКСПОЗИЦИИ В УСЛОВИЯХ ЯКУТИИ

удлинения при разрыве и прочности при растяжении образцов в зависимости от времени экспонирования.

Стабилизация ПКМ противостарителем марки СО-4 приводит к сохранению деформационно-прочностных показателей до 14 мес. экспонирования в отличие от исходных образцов СВМПЭ и ПКМ, однако относительное удлинение при разрыве стабилизированного ПКМ начинает монотонно снижаться, начиная с 14 месяца экспонирования (рисунок 1), а прочность при растяжении начинает снижаться с 13 месяца (рисунок 2).

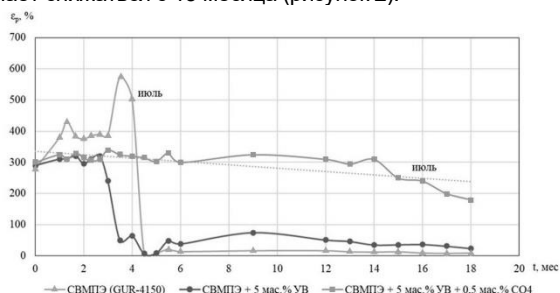


Рисунок 1 – Зависимость относительного удлинения при разрыве образцов от времени экспонирования

Figure 1 – Dependence of relative elongation at break of samples on exposure time

На 18 месяц экспонирования значение относительного удлинения при разрыве и прочности при растяжении стабилизированного ПКМ составляет 180 % и

22,2 МПа соответственно. Это, вероятно, можно объяснить с расходом стабилизатора на ингибирование радикально-окислительных реакций, протекающих под воздействием кислорода воздуха в начальный период экспонирования образцов.

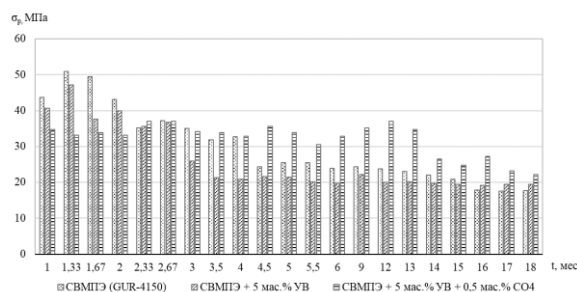


Рисунок 2 – Зависимость прочности при растяжении образцов от времени экспонирования

Figure 2 – Tensile strength of samples as a function of exposure time

Основное влияние на свойства оказывают реакции, приводящие к изменению молекулярной массы и молекулярно-массового распределения полимеров за счет протекания реакций обрыва цепи и сшивания. Эти изменения приводят к значительному увеличению плотности аморфных областей, что отражается на изменении степени кристалличности [7] и соответственно на их деформационно-прочностных характеристиках. В связи с этим, исследованы термодинамические характеристики образцов (таблица 1).

Таблица 1 – Термодинамические характеристики образцов / Table 1 – Thermodynamic characteristics of samples

	α , %	Т начала плавления, °С	Т пика плавления, °С	Т конца плавления, °С	ΔH , Дж/г
СВМПЭ исх	52,04	127,5	150,6	160,9	152,5
СВМПЭ 15 мес	62,89	127,2	184,3	161,3	184,3
СВМПЭ 18 мес	72,93	127,1	153,0	163,5	213,7
ПКМ исх	50,05	126,7	141,5	152,0	146,6
ПКМ 15 мес	56,76	123,5	149,5	158,0	166,3
ПКМ 18 мес	57,32	125,4	150,7	159,4	167,9
ПКМ + СО-4 исх	42,02	123,7	142,1	152,9	123,1
ПКМ + СО-4 15 мес	46,68	124,2	146,6	157,5	136,8
ПКМ + СО-4 18 мес	42,02	123,9	145,3	157,6	144,4

Известно, что степень кристалличности, определенная методом ДСК, учитывает тепловые процессы, происходящие при переходе кристаллической фазы в аморфную. При этом энтальпия плавления характеризует количество энергии, затрачиваемое на этот процесс. Показано, что при старении материалов резко возрастает степень кристалличности. Повышение степени кристалличности СВМПЭ связано с тем, что в результате разрыва макромолекул при окислении процесс кристаллизации облегчается. Это приводит к вторичной кристаллизации полимерной матрицы, прежде всего в аморфной части, характеризующейся наименее плотной упаковкой, как это показано в работах [8, 9]. Повышение значений энтальпии плавления экспонированных образцов свидетельствует, что в результате вторичной кристаллизации формируются большие по размеру структурные элементы.

У стабилизированных ПКМ значения степеней кристалличности практически не меняются, что связано с тем, что противостаритель ингибирует процессы окисления, в результате чего аморфная фаза практически не претерпевает изменений.

Известно, что световое старение является радикально-цепным процессом и, в силу малой проникающей способности УФ-излучения, окислительная деструкция протекает преимущественно на поверхностных слоях полимера [10]. В связи с этим, с целью обнаружения деградированного слоя исследованы поверхности образцов (рис. 3) после 18 месяцев экспонирования.

После 18 месяцев экспонирования на образцах СВМПЭ и ПКМ обнаружен поврежденный (деградированный) слой. У образцов СВМПЭ глубина деградированного слоя составляет ~500 мкм, у ПКМ – 600 мкм, соответственно. В случае стабилизированного ПКМ поврежденный слой визуально не обнаружен.

Для более детального изучения механизма старения и деградации были проведены ИК-спектроскопические исследования образцов стабилизированного ПКМ, экспонированных в течение 18 месяцев по глубине (рис. 4). Получены спектры образцов на следующих глубинах: 0, 20, 90, 130, 200, 410, 750, 1020 мкм. На ИК-спектрах поверхности образцов независимо от исследованной глубины зарегистрированы полосы поглощения в областях 2914, 2846, 1472, 1462, 729, 719 см^{-1} , относящиеся к $-\text{CH}_2-$ группам, характерных для СВМПЭ [11].

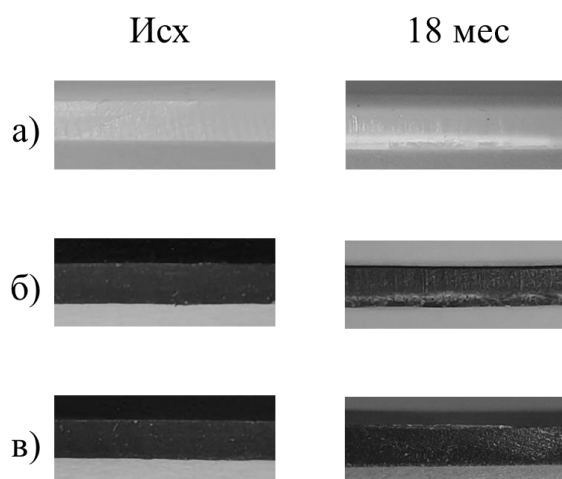


Рисунок 3 – Микрофотографии срезов экспонированных образцов: а) СВМПЭ; б) ПКМ; в) стабилизированного ПКМ

Figure 3 – Microphotographs of sections of exposed samples: а) UHMWPE; б) PCM; в) stabilized PCM

На глубинах исследованных слоев стабилизированного ПКМ в интервале 0–200 мкм зарегистрированы

появление новых пиков в области 909 см^{-1} и 1712 см^{-1} характерных для винильной и карбонильной групп соответственно. В работе авторов [12] показано, что образование карбонильных групп вследствие облучения напрямую связано с деструкцией макромолекул полиэтилена. Количественное определение продуктов деструкции СВМПЭ, а именно карбонильных и винильных групп производили с использованием следующих соотношений [13]:

$$I_{\text{карбонил}} = A_{1712}/A_{1368} \quad (1.1)$$

$$I_{\text{винил}} = A_{911}/A_{1368} \quad (1.2),$$

где A_{1712} – оптическая плотность пика при 1712 см^{-1} , соответствующего валентным колебаниям карбонильной группы в кетонах; A_{911} – оптическая плотность пика при 911 см^{-1} , соответствующего неплоским деформационным колебаниям С-Н в концевой винильной группе; A_{1368} – оптическая плотность пика при 1368 см^{-1} , который соответствует деформационным колебаниям метильных групп, связанных с третичным атомом углерода.

Пик при 1368 см^{-1} использован в качестве “внутреннего стандарта” для нормализации спектров, т.к. его интенсивность мало зависит от различных факторов, т.е. даже при протекании процессов деструкции, остается практически постоянной.

В таблице 2 приведены значения этих индексов в зависимости от глубины исследованного слоя ПКМ, рассчитанные по формулам 1.1 и 1.2.

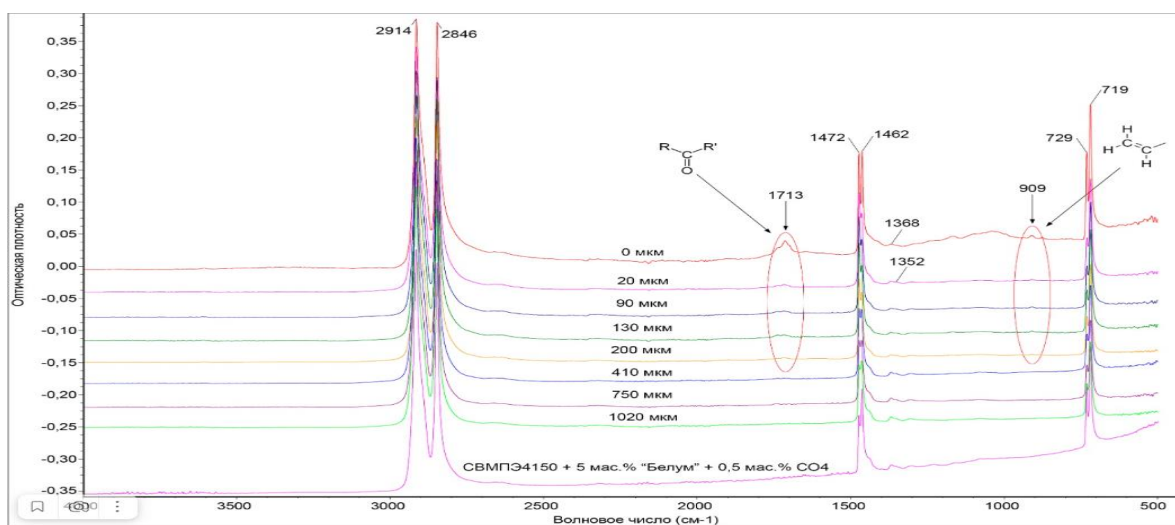


Рисунок 4 – ИК-спектры поверхности стабилизированного ПКМ в зависимости от глубины исследованного слоя

Figure 4 – IR spectra of the surface of stabilized PCM depending on the depth of the studied layer

Таблица 2 – Винильные и карбонильные индексы образцов стабилизированного ПКМ после натурального экспонирования в течение 18 месяцев

Table 2 – Vinyl and carbonyl indices of stabilized PCM samples after natural exposure for 18 months

Глубина поврежденного слоя, мкм	Винильный индекс ($I_{\text{винил}}$)	Карбонильный индекс ($I_{\text{карбонил}}$)
0	3,32	46,74
20	0,65	7,79
90	0,79	9,10
130	0,46	8,90
200	0,40	4,58
410	–	1,85
750	–	1,10
1020	–	0,86
СВМПЭ + 5 мас. % УВ + 0,5 мас. % СО-4 (контрольный)	–	–

Протекание фотохимической деструкции сопровождается на начальном этапе окислением – образо-

ванием карбонильных групп, в свою очередь, карбонильные группы образуют винильные группы. Установ-

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ И СТРУКТУРЫ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА И ЕГО КОМПОЗИТА В ПРОЦЕССЕ НАТУРНОЙ ЭКСПОЗИЦИИ В УСЛОВИЯХ ЯКУТИИ

лено, что наибольшие значения винильного и карбонильного индексов зарегистрированы непосредственно на поверхности поврежденного слоя образца. По мере углубления в объем материала значения обоих индексов уменьшаются. На основании результатов ИК-исследований установлено, что процессы образования винильных групп протекают на поверхностном и подповерхностных слоях стабилизированного композита глубиной до 200 мкм, и не затрагивают основной объем полимерной матрицы. Карбонильные группы обнаружены вплоть до глубины 1020 мкм, однако, это может быть связано не только с термоокислительными процессами при атмосферном старении, но и с процессами термомеханической деструкции на

стадии переработки полимера [14].

В работе [15] нами было показано, что протекание окислительных процессов СВМПЭ зарегистрировано вплоть до глубины 600 мкм. Таким образом, выявлено, что дополнительное модифицирование ПКМ стабилизатором приводит к ингибированию окислительных процессов.

Проведены триботехнические испытания экспонированных образцов СВМПЭ и стабилизированного ПКМ (рисунок 5). Испытания проводили на машине трения ИИ-5018 при нагрузке 200 Н и скорости скольжения контртела 0,5 м/с. Образцы были выставлены в марте 2021 г, этапы выемки – 1, 3, 6, 12, 18 мес.

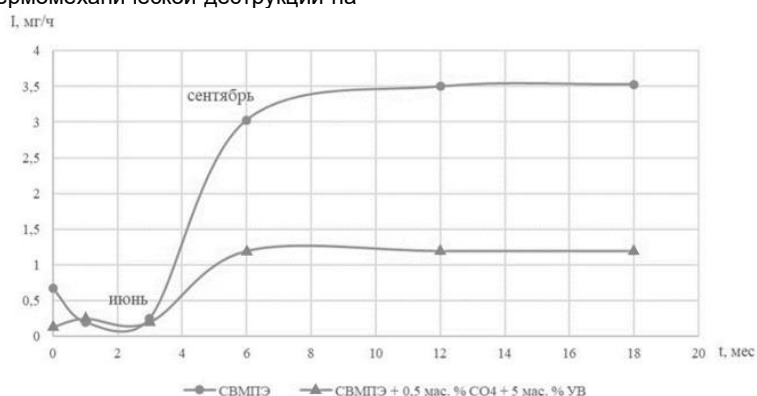


Рисунок 5 – Скорость массового изнашивания образцов

Figure 5 – Mass wear rate of samples

Показано, что у образцов СВМПЭ, экспонированных в течение 1 мес., износостойкость выше по сравнению с контрольными образцами. Это, видимо, связано с повышением деформационно-прочностных показателей образцов при экспонировании в течении 1 месяца на открытом стенде полигона. Увеличение времени экспонирования до 6 месяцев приводит к существенному снижению износостойкости СВМПЭ до 5,2 раз, далее скорость массового изнашивания образцов в зависимости от времени экспонирования начинает снижаться, и начиная с 12 до 18 месяцев экспонирования у образцов скорости массового изнашивания находятся на одном уровне. Это связано с тем, что в процессе трения сначала происходит интенсивный износ состаренного слоя образца, после достижения основного слоя материала скорость изнашивания начинает тормозиться [16].

Износостойкость стабилизированного ПКМ выше в 2,5–3 раза, при этом характер изменения скорости массового изнашивания от времени экспонирования аналогичен для СВМПЭ.

Для объяснения подобного изменения свойств проведены ИК-исследования поверхностей исходных (контрольных) и экспонированных образцов до и после трения. На рисунке 6 приведены ИК-спектры поверхности образцов, экспонированных 1 месяц.

Установлено, что ИК-спектры поверхностей контрольных и экспонированных образцов до трения практически не отличаются, т.е. при экспонировании в течение 1 месяца окислительно-деструктивные процессы не протекают. Появление пика в области 876 см⁻¹ на поверхности экспонированных образцов СВМПЭ связано с протеканием химических реакций между кислородсодержащими группами и кальцитом, содержащимся в уличной

пыли.

На ИК-спектрах поверхностей всех образцов после трения появляются пики в областях ~1713 см⁻¹, 1586 см⁻¹, 1367 см⁻¹, 1170 см⁻¹, соответствующие валентным колебаниям карбонильных, карбоксильных и гидроксильных групп, свидетельствующие о протекании трибохимических процессов в результате трибонагружения. Процессы трибоокисления полимерной матрицы способствуют образованию устойчивой пленки переноса, что благоприятно сказывается на триботехнических свойствах композитов [17].

На рисунке 7 приведены ИК-спектры поверхности образцов, экспонированных 18 месяцев, до и после трения.

На поверхностях образцов до трения зарегистрировано появление пиков карбонильной группы в разных ее проявлениях, более интенсивных, чем после трения (1712-1719 см⁻¹). При этом интенсивность пика в области 1712 см⁻¹ на поверхности образцов после трения снижается, что связано с износом состаренного слоя, и с образованием вновь окисленных фрагментов в процессе трения [18–20]. О протекании светового старения (фотохимической деструкции) свидетельствует наличие винильной группы на поверхности образца (907-910 см⁻¹). Пики в областях 875 см⁻¹ и 1032 см⁻¹, зарегистрированные на образцах до трения, относятся к колебаниям кальцита и алюмосиликата (бентонит), что указывает на наличие на поверхности образцов уличной пыли [21, 22].

Таким образом, выявлено, что в процессе трения экспонированных образцов СВМПЭ и стабилизированного ПКМ в первую очередь изнашивается деградированный (состаренный) поверхностный слой, массовый износ зависит от глубины протекания фотохимической деструкции.

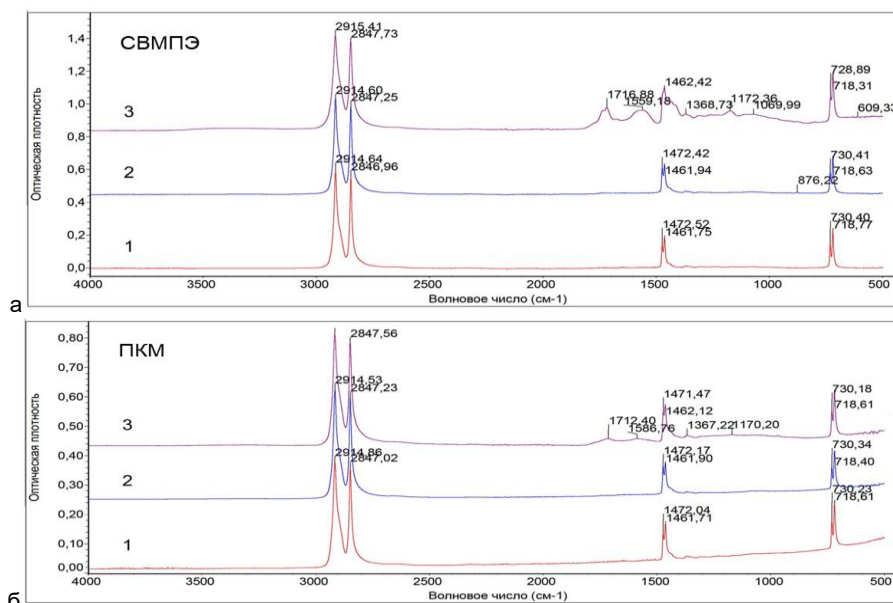


Рисунок 6 – ИК-спектры образцов СВМПЭ (а) и стабилизированного ПКМ (б), экспонированных 1 месяц: 1 – исходный неэкспонированный (контрольный); 2 – до трения; 3 – после трения

Figure 6 – IR spectra of UHMWPE samples (a) and stabilized PCM (b), exposed for 1 month: 1 – initial unexposed (control); 2 – before friction; 3 – after friction

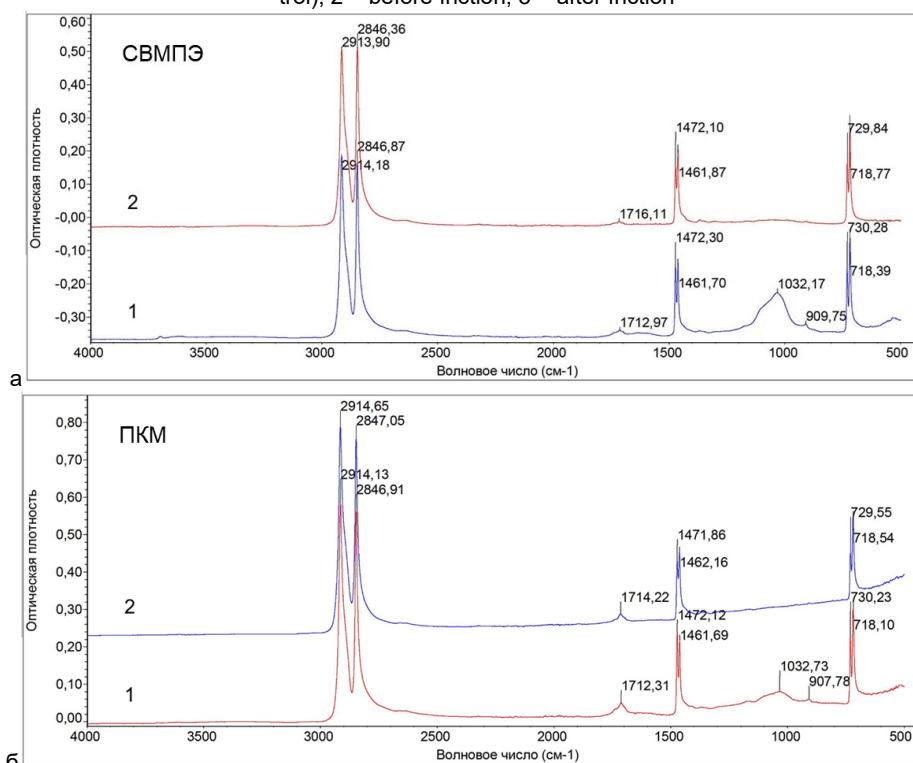


Рисунок 7 – ИК-спектры образцов СВМПЭ (а) и стабилизированного ПКМ (б), экспонированных 18 месяцев: 1 – до трения; 2 – после трения

Figure 7 – IR spectra of UHMWPE samples (a) and stabilized PCM (b), exposed for 18 months: 1 – before friction; 2 – after friction

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявлено, что у стабилизированных ПКМ значения степеней кристалличности практически не меняется, что связано с тем, что противостаритель ингибирует процессы окислительной деструкции, в результате чего аморфная фаза практически не претерпевает изменений.

На основании результатов ИК-исследований

установлено, что процессы образования винильных групп протекают на поверхностном и подповерхностных слоях композита глубиной до 200 мкм, и не затрагивают основной объем полимерной матрицы.

Установлено, что в процессе трения экспонированных образцов СВМПЭ и стабилизированного ПКМ в

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ И СТРУКТУРЫ СВЕРХВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНОГО ПОЛИЭТИЛЕНА И ЕГО КОМПОЗИТА В ПРОЦЕССЕ НАТУРНОЙ ЭКСПОЗИЦИИ В УСЛОВИЯХ ЯКУТИИ

первую очередь изнашивается деградированный (состаренный) поверхностный слой, массовый износ зависит от глубины протекания фотохимической деструкции.

Таким образом, на основании проведенных исследований установлено, что дополнительная модификация композита СВМПЭ-УВ стабилизатором марки СО-4 в количестве 0,5 мас. % приводит к замедлению процессов старения композита на открытом воздухе, что положительно сказывается на сохранении физико-механических показателей и износостойкости длительного времени в условиях воздействия неблагоприятных климатических факторов Якутии. Однако климатическая стойкость стабилизированного ПКМ после экспонирования в течение 14 месяцев начинает снижаться, что вызывает необходимость корректировки состава композита для обеспечения долгосрочного действия стабилизирующей добавки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) market size, share & trends analysis report by product (medical grade & prosthetics, fibers, sheet), by application, and segment forecasts, 2019–2025 // Grand View Research, Inc. URL: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/ultra-high-molecular-weight-polyethylene-market> (дата обращения: 11.11.2019).
2. Влияние технологического режима смешения и вулканизующей системы на свойства композиций на основе бутадиен-нитрильного каучука и сверхвысокомолекулярного полиэтилена / Н.В. Шадрин [и др.]. // Перспективные материалы. 2023. № 2. С. 32–37.
3. Валуева М.И., Колобков А.С., Малаховский С.С. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен: рынок, свойства, направления применения (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 3 (87). С. 49–57.
4. Михайлин Ю.А. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (часть 1) // Полимерные материалы. 2003. № 3. С. 18–21.
5. Модифицированные полимерные и композиционные материалы для северных условий / Аммосова О.А., Аргунова А.Г., Ботвин Г.В. и др.: отв. ред. С.Н. Попов; Рос. акад. наук, Сиб. отд.-ние, Ин-т проблем нефти и газа. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. 218 с.
6. Колесова Е.С., Гоголева О.В., Петрова П.Н. Разработка ПКМ на основе СВМПЭ с высокой стабильностью свойств в условиях резко-континентального климата // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021. Т. 26, № 4. С. 122–131.
7. Далинkevич А.А. Кинетика окислительного старения и модификации полиолефинов при воздействии излучений: дис. ... докт. хим. наук: 02.00.06: защищена 18.06.1998: утв. 02.06.1998 / Далинkevич Андрей Александрович. М.: Институт химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской Академии Наук. 1998. 405 с.
8. Rodriguez A.K., Mansoor B., Ayoub G., Colin X., Benzerga A.A. Effect of UV-aging on the mechanical and fracture behavior of low density polyethylene // Polymer Degradation and Stability. 2020. Vol. 180. P. 109185.
9. Yusuke H., Takumitsu K., Kento T., Toshio I., Kohhei N. // Polymer Degradation and Stability. 2018. Vol. 150. P. 67–72.
10. Fontanella S., Bonhomme S., Koutnyc M. et al. Comparison of the biodegradability of various polyethylene films containing pro-oxidant // Polymer Degradation and Stability. 2010. Vol. 95, No 6. P. 1011–1021.
11. Тарасевич Б.Н. ИК спектры основных классов органических соединений. Справочные материалы. М.: Химический факультет МГУ, 2012. 54 с.

Химический факультет МГУ, 2012. 54 с.

12. Fu Y., Lim L.T. Investigation of multiple-component diffusion through LLDPE film using an FTIR-ATR technique // Polymer Testing. 2008. Vol. 31. P. 56–67.

13. Hsu Yu-Ch., Weir M.P., Truss R.W., et al. A fundamental study on photo-oxidative degradation of linear low density polyethylene films at embrittlement // Polymer. 2012. Vol. 53, No 12. P. 2385–2393.

14. Смирнова А.И., Осовская И.И. Функциональные материалы в производстве пластмасс: Антиоксиданты: учебное пособие. СПб: СПбГТУРП, 2015. 31 с.

15. Изучение влияния климатических факторов Якутии на структуру и свойства СВМПЭ и ПКМ на его основе / Е.С. Колесова [и др.]. // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2024. № 6. С. 2–9.

16. Копнов В.А. Оптимальное управление процессами деградации элементов механических систем. Екатеринбург: Изд-во Рос. гос. проф.-пед. ун-та, 2017. 305 с.

17. Природа первичных актов фрикционного взаимодействия СВМПЭ с поверхностью стали / А.П. Краснов [и др.]. // Трение и износ. 2013. № 2 (34). С. 154–164.

18. Трение и свойства СВМПЭ, обработанного сверхкритическим диоксидом углерода / А.П. Краснов [и др.]. // Трение и износ. 2003. № 4 (24). С. 429–435.

19. Влияние наноструктурных наполнителей на структуру и свойства газопламенных покрытий на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена / Панин С.В. [и др.]. // Физическая мезомеханика. 2006. Т. 9. С. 141–144.

20. Rocha M., Mansur A., Mansur H. Characterization and accelerated ageing of UHMWPE used in orthopedic prosthesis by peroxide // Materials. 2009. No 2. P. 562–576.

21. Jovanovski G., Stefov V., Šoptrajanov B., Boev B. Minerals from Macedonia. IV. Discrimination between some carbonate minerals by FTIR spectroscopy. // Neues Jahrbuch für Mineralogie – Abhandlungen. 2002. Vol. 177. P. 241–253.

22. Masindi V., Gitari M. W., Tutu H., DeBeer M. Efficiency of ball milled South African bentonite clay for remediation of acid mine drainage // Journal of Water Process Engineering. 2015. Vol. 8. P. 227–240.

Информация об авторах

О. В. Гоголева – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института проблем нефти и газа Сибирского отделения РАН.

П. Н. Петрова – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Института проблем нефти и газа Сибирского отделения РАН.

А. Л. Федоров – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института проблем нефти и газа Сибирского отделения РАН.

Information about the authors

O. V. Gogoleva, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of Institute of Oil and Gas Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

P. N. Petrova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Leading Researcher of Institute of Oil and Gas Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

A. L. Fedorov, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of Institute of Oil and Gas Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 31 июля 2024; одобрена после рецензирования 20 мая 2025; принята к публикации 26 мая 2025.

The article was received by the editorial board on 31 July 2024; approved after editing on 20 May 2025; accepted for publication on 26 May 2025.