Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-3-404-412 Оригинальная статья/Research article
УДК 678.012:547 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Перспективы использования стабилизированного СВМПЭ-композита в качестве футеровочных покрытий для защиты горного оборудования в зонах холодного климата РФ

Ольга В. Гоголева [1] oli-gogoleva@ya.ru 0000-0001-5425-2295
Павлина Н. Петрова [1] ppavlina@ya.ru 0000-0002-1859-8034
Марина Д. Соколова [1] marsokol@mail.ru 0000-0003-2306-5870
Андрей Л. Федоров [1] gelvirb@mail.ru 0000-0002-1718-2643
Борис Н. Заровняев [2] mine_academy@mail.ru 0009-0000-3738-566x

1 Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр», пр-т М. Николаева, 20, г. Якутск, 677007, Россия
2 Северо-Восточный университет им. М.К. Аммосова, ул. Кулаковского, 50, г. Якутск, 677016, Россия

Аннотация. Футеровка является неотъемлемым элементом современного горнодобывающего оборудования, обеспечивающим не только его защиту от экстремального абразивного износа, но и саму возможность высокоэффективной реализации технологических процессов. Эволюция материалов для футеровки прошла путь от марганцовистых сталей и высокохромистых чугунов до современных полимерных композитов. Одним из самых перспективных футеровочных материалов в настоящее время является сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) и его композиты. В представляемой статье приведены результаты исследований по повышению стойкости композита на основе СВМПЭ и углеродных волокон с дополнительным введением стабилизатора фенольного типа марки СО-4. Исследована динамика изменения свойств и структуры стабилизированного композита при натурном экспонировании под воздействием резко-континентального климата Якутии. Установлено, что дополнительная модификация СВМПЭ-композита стабилизатором марки СО-4 приводит к сохранению деформационно-прочностных и триботехнических показателей в течение 36 месяцев. По результатам инфракрасной спектрометрии выявлено, что СО-4 ингибирует протекание окислительных реакций в объем композита, что приводит к повышению износостойкости стабилизированных полимерных композиционных материалов в 3,5 раз по сравнению с нестабилизированными композитами. Разработанный материал обладает комплексом улучшенных эксплуатационных свойств, включая повышенную износо-, морозостойкость, устойчивость к агрессивным средам и высокую атмосферную стойкость. Стабилизированный полимерный композиционный материал на основе можно рекомендовать для футеровки горнодобывающего оборудования, эксплуатирующихся на открытом воздухе в резко-континентальном холодном климате РФ.

Ключевые слова: сверхвысокомолекулярный полиэтилен, стабилизатор, полимерный композиционный материал, футеровка, износостойкость, атмосферная стойкость, климатические испытания..

Prospects for using stabilized ultrahigh molecular weight polyethylene - composite as lining coatings to protect mining equipment in cold climate zones of the Russian Federation

Olga V. Gogoleva [1] oli-gogoleva@ya.ru 0000-0001-5425-2295
Pavlina N. Petrova [1] ppavlina@ya.ru 0000-0002-1859-8034
Marina D. Sokolova [1] marsokol@mail.ru 0000-0003-2306-5870
Andrey L. Fedorov [1] gelvirb@mail.ru 0000-0002-1718-2643
Boris N. Zarovnyaev [2] mine_academy@mail.ru 0009-0000-3738-566x

1 Federal Research Center Yakut Scientific Center SB RAS", M. Nikolaeva Av., 20, Yakutsk, 2 677007, Russia
North-Eastern Federal University, Kulakovskaya St., 50, Yakutsk 677016, Russia

Abstract. Lining is an integral element of modern mining equipment, providing not only its protection from extreme abrasive wear, but also the very possibility of highly efficient implementation of technological processes. The evolution of lining materials has gone from manganese steels and high-chromium cast irons to modern polymer composites. One of the most promising lining materials at present is ultrahigh molecular weight polyethylene (UHMWPE) and its composites. The presented article presents the results of research on increasing the durability of a composite based on UHMWPE and carbon fibers with the additional introduction of a phenolic stabilizer of the CO-4 brand. The dynamics of changes in the properties and structure of a stabilized composite during full-scale exposure under the influence of the sharply continental climate of Yakutia is investigated. It was found that an additional modification of the UHMWPE composite with a stabilizer of the CO-4 brand leads to the preservation of deformation, strength and tribotechnical parameters for 36 months. According to the results of infrared spectrometry, it was revealed that CO-4 inhibits the course of oxidative reactions in the volume of the composite, which leads to an increase in the wear resistance of stabilized polymer composite materials by 3.5 times compared with unstable composites. The developed material has a set of improved operational properties, including increased wear and frost resistance, resistance to aggressive environments and high atmospheric resistance. A stabilized polymer composite based on can be recommended for lining mining equipment operated outdoors in the sharply continental cold climate of the Russian Federation.

Keywords: ultrahigh molecular weight polyethylene, stabilizer, polymer composite material, lining, wear resistance, atmospheric resistance, climatic tests.

Для цитирования
Гоголева О.В., Петрова П.Н., Соколова М.Д,, Федоров А.Л., Заровняев Б.Н. Перспективы использования стабилизированного СВМПЭ-композита в качестве футеровочных покрытий для защиты горного оборудования в зонах холодного климата РФ // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 3. С. 404–412. doi:10.20914/2310-1202-2026-3-404-412

For citation
Gogoleva O.V., Petrova P.N., Sokolova M.D., Fedorov A.L., Zarovnyaev B.N. Prospects for using stabilized ultrahigh molecular weight polyethylene -composite as lining coatings to protect mining equipment in cold climate zones of the Russian Federation. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 3. pp. 404–412. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-3-404-412

© 2026, Гоголева О.В.. и др. / Gogoleva O.V. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Футеровка поверхностей оборудования в горнодобывающей промышленности играет ключевую роль. Необходимость применения специализированных футеровок в горном деле обусловлена комплексом неблагоприятных эксплуатационных факторов. Горнодобывающее оборудование постоянно взаимодействует с абразивными материалами рудой, пульпой, вскрышными породами, что приводит к интенсивному абразивному и эрозионному изнашиванию металлических поверхностей.

Ключевые причины внедрения футеровки включают:

1. Защита от абразивного износа и ударных нагрузок. Высокая твёрдость и острота частиц горной массы вызывают быстрое разрушение незащищённых металлических поверхностей. Футеровка принимает на себя основной износ, являясь «жертвенным» слоем.

2. Снижение эксплуатационных затрат и простоев. Использование качественной футеровки многократно увеличивает срок службы оборудования, сокращает частоту аварийных остановок на ремонт и снижает затраты на замену дорогостоящих узлов.

3. Обеспечение бесперебойности технологического процесса. Предотвращение налипания и намерзания горной массы на рабочие поверхности, а также ликвидация проблем «сводообразования» и образования «крысиных нор» (ratholing) в бункерах и жёлобах обеспечивает стабильную сыпучесть материала и равномерную подачу сырья.

4. Повышение энергоэффективности. Футеровки с низким коэффициентом трения (например, на основе полимеров) снижают сопротивление движению материала, что напрямую уменьшает энергопотребление приводов и повышает общую эффективность переработки полезных ископаемых [1–3].

Выбор материала футеровки – это многокритериальная задача, которая решается на основе анализа абразивной и коррозионной стойкости, ударной вязкости, стоимости, массы и геометрии футеруемой поверхности. В горнодобывающей промышленности наиболее распространены металлические (аустенитная, хромомолибденовая стали и т. д.), керамические (оксид алюминия, карбид кремния и т. д.) и резиновые футеровки. В последние десятилетия наблюдается устойчивый тренд на внедрение полимерных футеровочных материалов, которые не только не уступают, а по ряду ключевых параметров превосходят традиционные металлические и резиновые аналоги. К основным типам полимерных футеровок относятся полиуретан, полимочевина и СВМПЭ. Среди полимерных футеровочных материалов СВМПЭ является наиболее технологически продвинутым и быстрорастущим сегментом полимерных футеровок.

СВМПЭ-композиты обладают высокой износостойкостью, ударной вязкостью, морозостойкостью, химической стойкостью, вибростойкостью, низким коэффициентом трения и водопоглощением. Благодаря уникальному сочетанию эксплуатационных свойств, материал выделяется как один из самых перспективных для горной промышленности [4–9].

Для решения специфических задач горного производства разрабатываются и совершенствуются конусные дробилки в направлении повышения износостойкости футеровочных покрытий и производительности, что является актуальной задачей для горного машиностроения. В работах [10–12] исследованы взаимодействие куска породы с рабочей поверхностью футеровки мельниц и различного рода наплавок. Предложены волновые резиновые футеровки с насыщением рабочей поверхности шарами либо завулканизированными элементами из металла. При этом изменяется динамика движения внутримельничной загрузки, интенсифицируется процесс разделения минералов, повышается производительность мельниц как по питанию, так и готовому классу. Однако, наблюдается высокий износ футеровочных покрытий. В связи с этим применение износостойких СВМПЭ-композитов в качестве футеровок в горном деле чрезвычайно важен и широк:

- Футеровка бункеров и приёмных воронок. Установка листов СВМПЭ в бункеры и загрузочные воронки обеспечивает стабильный сход материала, исключая налипание и подвисание сырья, что напрямую повышает производительность перегрузочных узлов.
- Футеровка кузовов карьерных самосвалов и вагонов. Покрытие из СВМПЭ увеличивает коэффициент использования подвижного состава, защищает металл от истирания и предотвращает примерзание и налипание вскрышных пород и концентратов.
- Футеровка ковшей экскаваторов. Практика Переясловского разреза (Красноярский край) показала, что футеровка ковшей экскаваторов ЭКГ листами СВМПЭ РЕ-1000 позволяет увеличить ресурс ковша, снизить влияние ударных нагрузок и значительно уменьшить налипание породы. Один из зафутерованных ковшей успешно эксплуатировался более года.

• Футеровка жёлобов и перегрузочных пунктов. Низкий коэффициент трения гарантирует плавное скольжение руды даже под малыми углами наклона, предотвращая забивание желобов и аварийные остановки конвейерных линий.

В России основные горнодобывающие предприятия находятся в зонах с холодным климатом, в том числе арктическом. Кроме того, эти территории являются стратегическими для экономики страны, на которых идет активное освоение новых месторождений полезных ископаемых. В связи с этим разработка материалов, которые будут использоваться в таких экстремальных условиях, должны включать исследование влияния климатических факторов и является актуальной научной проблемой.

Цель работы: исследование воздействия климатических факторов резко-континентального климата Якутии свойства и структуру композитов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена.

Материалы и методы

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), представляющий собой пространственно-затрудненный фенол – ди-[3-(3,5 – ди-(1,1 – диметилэтил) – 4-гидроксифенил) пропил]дисульфид.

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.

Образцы были выставлены в виде лопаток и столбиков на открытой атмосферной площадке полигона «Якутск» согласно ГОСТ 9.708–83. Срок экспонирования – 36 месяцев.

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 Spectrometr в области частот 400–4000 см-1 с приставкой нарушенного полного внутреннего отражения.

Обсуждение результатов

На рисунке 1 представлены результаты изменения относительного удлинения при разрыве образцов в зависимости от продолжительности экспонирования. Увеличение значений относительного удлинения при разрыве образцов СВМПЭ после 1–3 месяцев экспонирования может быть связано с релаксационными процессами, т. е. с конформационными колебаниями макромолекул, стремящихся к статическому равновесию, из-за этого облегчается ориентационное упрочнение в процессе растяжения [13, 14]. Также это свидетельствует о том, что наряду с релаксационными процессами протекают процессы деструкции макромолекулярных цепей, которые временно преобладают над процессами их сшивания, при этом зарегистрированный на 4 мес. экспонирования «пик» пластичности является крайней «точкой», после чего процессы сшивания полимерных цепей СВМПЭ начинают превалировать над процессами деструкции, т. е. образующиеся при деструкции радикалы, взаимодействуя между собой образуют пространственно-сшитую структуру [15, 16]. В итоге на 135 день экспонирования наблюдается резкий спад эластичности и происходит хрупкое разрушение СВМПЭ.

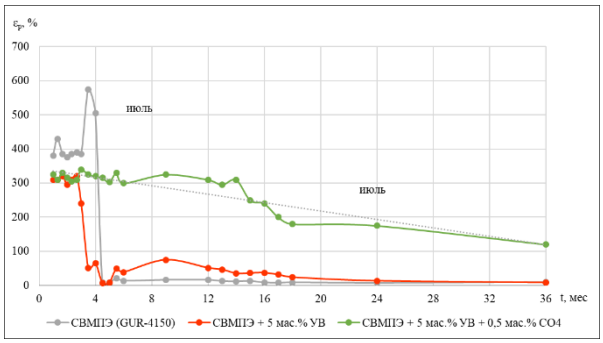


Рисунок 1. Зависимость относительного удлинения при разрыве образцов в зависимости от продолжительности экспонирования

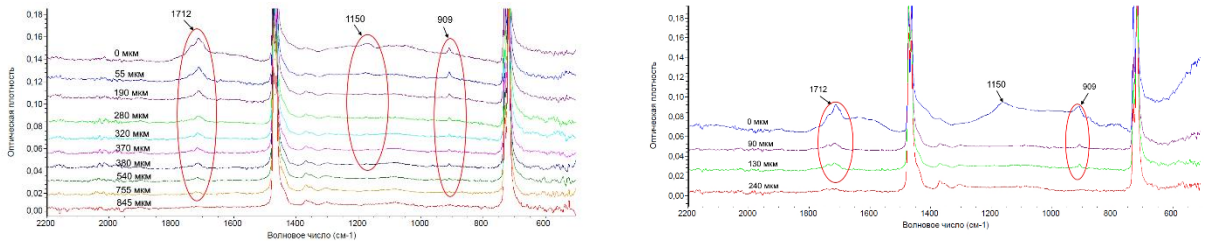
Figure 1. Dependence of the elongation at break of the samples depending on the duration of exposure

Установлено, что у композита, модифицированного только УВ, резкое снижение значений показателей относительного удлинения при разрыве также наблюдается на 135 день экспонирования. В отличие от ненаполненного СВМПЭ в этом случае не регистрируются зна-

чительного повышения деформационной способности на 1–2-ой месяц экспонирования при повышении значений прочности при разрыве, что может быть связано с увеличением жесткости материала при модифицировании УВ. Резкий спад относительного удлинения у нестабилизированного композита может свидетельствовать об интенсификации процессов фотохимической деструкции в композите за счет наличия легкоокисляемых функциональных групп на поверхности углеродных волокон, например, ОН-групп, которые относятся к группам, поглощающих свет [17].

Установлено, что значения относительного удлинения при разрыве композита, дополнительно модифицированного 0,5 мас. % стабилизатора, сохраняется в течение 14 месяцев. Начиная с 15 месяца экспонирования значения относительного удлинения при разрыве стабилизированного ПКМ начинает монотонно снижаться, что, вероятно, связано с расходованием стабилизатора на ингибирование радикально-окислительных реакций, протекающих под воздействием кислорода воздуха в начальный период экспонирования образцов на открытом стенде полигона климатических испытаний «Якутск» [18]. Тем не менее, критического изменения свойств у стабилизированного ПКМ экспонированного в течение 36 месяцев не зарегистрировано, он не теряет пластичность, т. к. относительное удлинения при разрыве остается на уровне 120%.

Для раскрытия механизма протекания окислительно-деструктивных процессов старения методом ИК-спектроскопии была изучена структура экспонированных в течение 36 месяцев образцов композита СВМПЭ–УВ и стабилизированного композита по глубине. На рисунке 2, а, представлены ИК-спектры образца нестабилизированного композита по глубине.



(a) (b)

Рисунок 2. ИК-спектры поверхностей экспонированных в течение 36 месяцев образцов: (a) – ПКМ; (b) – стабилизированный ПКМ

Figure 2. IR spectra of surfaces of samples exposed for 36 months: (a) – PCM; (b) – stabilized PCM

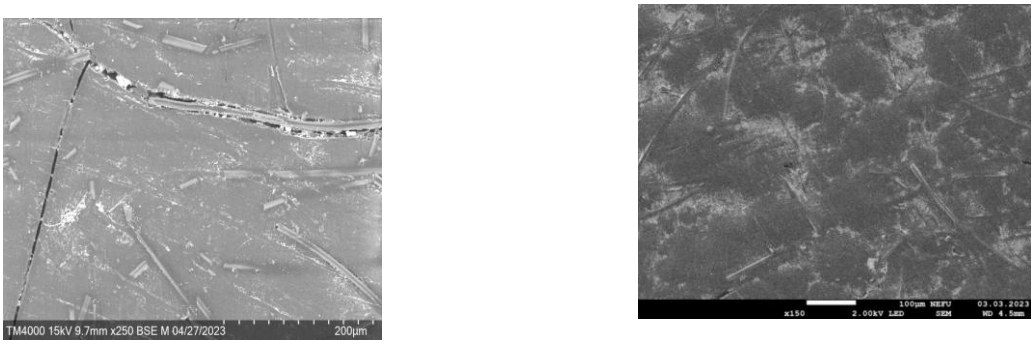
Выявлено, что независимо от исследованной глубины во всех образцах проявляются характеристические колебания полиэтилена [19]. Так, на ИК-спектрах поверхностей ПКМ наблюдаются полосы поглощения, соответствующие симметричным и асимметричным валентным колебаниям С–Н в области 2913 $см^{-1}$ и 2846 $см^{-1}$, 1472 и 1463 $см^{-1}$, ответственные за деформационные колебания С–Н, и полосы 730 $см^{-1}$, соответствующие маятниковым колебаниям CH_2-групп транс-сегментов, которые находятся только в кристаллической фазе полимера. Полоса при 720 $см^{-1}$ соответствует маятниковым колебаниям CH_2-групп в аморфно-кристаллических областях [19, 20].

О химических изменениях, протекающих в образцах при климатическом старении, свидетельствуют полосы поглощения при 1712, 1150 и 911 $см^{-1}$, которые указывают на формирование карбонильных, эфирных (гидроксильных) и концевых винильных групп. В работе [21] показано, что образование карбонильных и винильных групп вследствие облучения напрямую связано с деструкцией макромолекул полиэтилена, которая проходит по радикальному механизму. Увеличение количества этих групп связано с протеканием в полимерной матрице окислительной деструкции, инициированных ультрафиолетовой частью спектра солнечного излучения.

На поверхностях стабилизированного ПКМ (рисунок 2, б) окисленные кислородсодержащие группы выявлены непосредственно на поверхности и до глубины 130 мкм. Таким образом, установлено, что после 36 месяцев натурной экспозиции деградированный окисленный слой в нестабилизированном ПКМ зарегистрирован до глубины 910 мкм, а в стабилизированном ПКМ глубина окисленного слоя

не доходит до 240 мкм. Это можно объяснить эффективным действием СО-4, который замедляет / ингибирует процессы окисления и ограничивает проникновение деструктивных процессов вглубь материала.

На рисунке 3 приведены микрофотографии поверхностей экспонированных в течение 36 месяцев образцов ПКМ и стабилизированного ПКМ. Наглядно продемонстрировано появление трещин на поверхности экспонированного полимерного композита (рисунок 3, а).



(a) (b)

Рисунок 3. Поверхности экспонированных образцов: (а) – ПКМ; (b) – стабилизированный ПКМ

Figure 3. Surfaces of exposed samples: (a) – PCM; (b) – stabilized PCM

Появление на поверхности ПКМ трещин можно связать с активным протеканием окислительно-деструктивных процессов при воздействии климатических факторов (УФ, температура, влажность) приводящих к фотоокислительной деградации полимерных цепей, что существенно снижает механическую прочность поверхностного слоя, делая его более уязвимым к растрескиванию. В объёме материала активное протекание на поверхности окислительно-деструктивных процессов способствует активизации вторичной кристаллизации из фрагментов цепей, образовавшихся в результате деструкции, приводящей к изменению плотности упаковки макромолекул, и способствующей распространению трещин вглубь материала. Трещины являются открытыми каналами для проникновения влаги в объем композита, вызывающей целый ряд разрушительных процессов: гидролитическая деструкция матрицы, набухание с учетом температурных колебаний, вызывающее распространение существующих трещин и формирование новых, нарушение адгезионного взаимодействия на границе раздела фаз полимер-наполнитель [22, 23]. На микрофотографии образца стабилизированного ПКМ (рисунок 3, б) существенных изменений поверхности под воздействием климатических факторов не наблюдается.

Так как процесс старения начинается преимущественно с поверхности материала, приводя к образованию деградированного слоя, проведены триботехнические испытания экспонированных образцов ПКМ и стабилизированного ПКМ с целью выявления степени влияния окислительно-деструктивных процессов на износостойкость, которая является одним из основных рабочих параметров футеровочных материалов (рисунок 4).

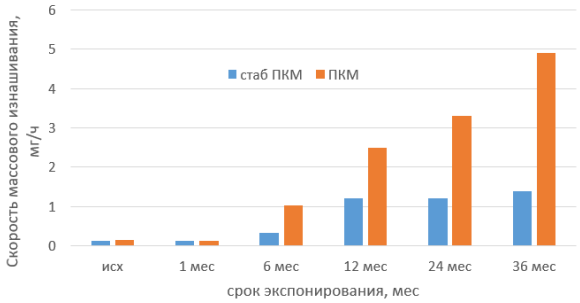


Рисунок 4. Зависимость скорости массового изнашивания от времени экспонирования композитов

Figure 4. Dependence of the rate of mass wear on the exposure time of composites

Показано, что скорость массового изнашивания нестабилизированного ПКМ начинает монотонно возрастать после 6 месяцев экспонирования, что связано с охрупчиванием материала после 4-х месяцев экспонирования. Значение скорости массового изнашивания после трех лет экспонирования достигает 4,9 мг/ч.

Зарегистрировано снижение износостойкости стабилизированного ПКМ до 2 раз после 6

месяцев экспонирования по сравнению с аналогичными данными для исходного неэкспонированного ПКМ, далее скорость массового изнашивания образцов независимо от времени экспонирования находится практически на одном уровне, и после трех лет экспонирования составляет 1,4 мг/ч.

Глубина проникновения окислительно-деструктивных процессов у стабилизированного ПКМ меньше в 3,8 раз (рисунок 2), что соизмеримо со снижением скорости массового изнашивания – 3,5 раз по сравнению с показателями нестабилизированного ПКМ.

На основании вышеописанных результатов исследований механизм трения экспонированных образцов ПКМ можно описать как двухстадийный процесс изнашивания (рисунок 5).



Рисунок 5. Схема трения: 1 – деградированный поверхностный слой; 2 – основной объем материала

Figure 5. Friction scheme: 1 – degraded surface layer; 2 – main volume of the material

На первом этапе происходит интенсивный износ деградированного поверхностного слоя, в котором имеются зоны локального разупрочнения, как было показано на рисунке 3. Этот деградированный слой при трении быстро разрушается, при этом микровырывы, отслоения продуктов износа происходит достаточно с высокой скоростью. На втором этапе происходит замедление износа после обнажения основного не состаренного подповерхностного слоя ПКМ.

Замедление износа по достижении основного не состаренного подповерхностного слоя ПКМ можно объяснить тем, что наполнитель УВ принимает на себя основную нагрузку, препятствуя пластическому деформированию и микрорезанию поверхности, при этом формируется стабильная оксидная плёнка, снижающая интенсивность износа [4, 25].

Исходя от условий эксплуатации и конструкции толщина футеровочных материалов составляет от 10 мм до 30 мм. Как было установлено выше (рисунок 2, б), после 36 месяцев экспонирования толщина окисленного / деградированного слоя стабилизированного композита составило менее 240 мкм, т. е. толщина деградированного слоя, в целом, не ухудшает износостойкие характеристики основного объема материала.

Таким образом, выявлено, что в процессе трения экспонированных образцов в первую очередь изнашивается деградированный (состаренный) поверхностный слой. Стабилизатор СО-4 ингибирует протекание окислительных реакций вглубь композита, что приводит к повышению износостойкости за счет меньшей толщины деградированного слоя.

Заключение

На основании исследования динамики изменения свойств и структуры СВМПЭ и его композитов при натурном экспонировании под воздействием резко-континентального климата Якутии установлено, что стабилизатор марки СО-4 приводит к сохранению деформационно-прочностных и триботехнических показателей в условиях воздействия климатических факторов РС(Я) в течение 36 месяцев. Применение стабилизатора демонстрирует высокую эффективность: срок службы образцов увеличивается в 9–10 раз. Данный результат обусловлен ингибированием радикальных реакций окисления, инициируемых УФ-излучением и кислородом воздуха, что особенно важно при эксплуатации в открытых условиях.

Таким образом, разработанные композиционные материалы демонстрируют реальный потенциал замены традиционных решений во всех ключевых областях применения. Они обладают комплексом улучшенных эксплуатационных свойств, включая повышенную износо-, морозостойкость, устойчивость к агрессивным средам и высокую атмосферную стойкость. Стабилизированный ПКМ можно рекомендовать для футеровки горнодобывающего оборудования, эксплуатирующихся на открытом воздухе в резко-континентальном холодном климате РФ.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации FWRS-2026–0027 рег. № 126022417885–6 с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования ФИЦ «ЯНЦ СО РАН»

Литература

1 Дубинкин Д.М., Исмаилова Ш.Я. Патентный анализ футеровок грузовых платформ карьерных самосвалов: конструктивные особенности технических решений // Горное оборудование и электромеханика. 2024. № 4 (174). С. 54–64. DOI: 10.26730/1816–4528–2024–4–54–64.

2 Агафонов А.А., Васильева М.А., Талеров К.П., Буевич В.В. Применение футеровочных материалов для футеровки скипов // Известия ТулГУ. 2024. Вып. 4. С. 196–208.

3 Титиевский Е.М., Чижик Е.Ф. Концепция научного, конструкторского и технологического обоснования применения резиновых футеровок в барабанных мельницах // Горный журнал. 2026. № 2. С. 80–87

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

5 Жирикова З.М., Алоев В.З. Деформационно-прочностные свойства ориентированных полимерных композитов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена. Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2023. 13(2). С. 17–20. https://doi.org/10.31143/2221–7789–2023–2–17–20.

6 Global and China ultrahigh molecular weight polyethylene (UHMWPE) industry. Report, 2019–2025 // MarketResearch.com. [Электронный ресурс]. – 2025. – URL: https://www.marketresearch.com/Research-in-China-v3266/Global-China-Ultra-High-Molecular-12403936 (дата обращения: 11.11.2025).

7 Сергеева Е.А., Хубатхузин А.А., Даловский К.Д. Износостойкий материал на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена // Современные наукоемкие технологии. 2025. № 5. С. 74–79. DOI 10.17513/snt.40393

8 Panin S.V., Buslovich D.G., Dontsov Yu. V. et al. Two-component feedstock based on ultra-high molecular weight polyethylene for additive manufacturing of medical products // Advanced Industrial and Engineering Polymer Research. 2021. Vol. 4, № 4. P. 235–250. DOI: 10.1016/j.aiepr.2021.05.003.

9 Заболотнова А.С., Гостева С.С., Гудков М.В. и др. Влияние сверхнизкого содержания графена на износостойкие свойства композитов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена. Высокомолекулярные соединения. Серия А. 2023. Т. 65, № 3. С. 230–236. DOI: 10.31857/S2308112023700517

10 Грядунов С.С., Сиваков В.В. Оценка износостойкости рабочих органов дробилок // Горный журнал. 2024. № 12. С. 71–75. DOI: 10.17580/gzh.2024.12.09.

11 Напольских С.А., Липатов А.Г., Фурин В.О., Журавлев А.Г. Совершенствование технологии первичного дробления железистых кварцитов Стойленского месторождения с применением модернизированных гирационных дробилок ККД-1500/180 // Горный журнал. 2021. № 6. С. 41–46. DOI: 10.17580/gzh.2021.06.02

12 Чижик Е.Ф. Новые конструкции и технологии производства резиновых футеровок для шаровых мельниц // Горный журнал. 2021. № 11. С. 39–45. DOI: 10.17580/gzh.2021.11.05

13 Каблов Е.Н., Лаптев А.Б., Прокопенко А.Н., Гуляев А.И. Релаксация полимерных композиционных материалов под длительным действием статической нагрузки и климата (обзор) Часть 1. Связующие // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4 (65). С. 70–80. DOI: 10.18577/2713–0193–2021–0–4–70–80.

14 Низин Д.Р., Низина Т.А., Пивкин Н.А., Спирин И.П., Чибулаев И.А. Влияние влагосодержания на климатическую стойкость полимерных материалов // Огарёв-online. 2024. Т. 12., № 9. С. 63–68.

15 Зырянова З.Е., Крынина А.И., Стаханова С.В. Анализ продуктов термоокислительной деструкции полиэтилена методом ИК-фурье спектроскопии // Успехи в химии и химической технологии. 2022. Т. XXXVI, № 8. С. 34–37

16 Киселева Т.Ю., Ковалева С.А., Григорьева Т.Ф. и др. Применение метода дифференциальной сканирующей калориметрии для изучения устойчивости композиционных материалов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена к облучению электронным пучком // Журнал физической химии. 2021. Т. 95, № 5. С. 678–685. DOI: 10.31857/S0044453721050174.

17 Сидорина А.И., Сафронов А.М. Исследование устойчивости углеродных волокон к окислению // Труды ВИАМ. 2022. № 7 (113). Ст. 06. DOI: 10.18577/2307–6046–2022–0–7–63–73.

18 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: 10.31242/2618–9712–2025–30–2–337–346.

19 Тарасевич Б.Н. ИК-спектры основных классов органических соединений. Справочные материалы. – М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2012. 54 с.

20 Казицына Л.А., Куплетская Н.Б. Применение УФ-, ИК- и ЯМР-спектроскопии в органической химии. – учеб. пособие для хим. специальностей ун-тов. – М.: Высш. школа, 1971. 264 с.

21 Gardette M., Perthue A., Gardette J.L. et al. Photo – and thermal-oxidation of polyethylene: Comparison of mechanisms and influence of unsaturation content // Polymer Degradation and Stability. 2013. 98 (11). P. 2383–2390.

22 Нечаев Д.В., Швецов О.В., Ермаков С.Б. Оценка деградации свайных полимерно-композитных труб под воздействием УФ-излучения, повышенной температуры и влажности // Глобальная энергия. 2025. Т. 31, № 1. С. 136–145. DOI: 10.18721/JEST.31110

23 Jiang C., Zhou J., Cui J., Shi J., Miao C. Fatigue analysis of spherulitic semi-crystalline polymers: Unveiling the effects of microstructure and defect // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2024, vol. 47, is. 11, pp. 4063–4080. doi: 10.1111/ffe.14405.

24 Gogoleva O.V., Sharin P.P., Petrova P.N. et al The development of high-strength wear-resistant composites based on uhmwpe and nanodiamonds // Inorganic Materials: Applied Research. 2024. T. 15. № 1. C. 183–189.

References

1 Dubinkin D.M., Ismailova Sh. Ya. Patent analysis of the linings of cargo platforms of mining dump trucks: design features of technical solutions // Mining equipment and electromechanics. 2024. No. 4 (174). pp. 54–64. DOI: 10.26730/1816–4528–2024–4–54–64. (in Russian).

2 Agafonov A.A., Vasilyeva M.A., Talerov K.P., Buevich V.V. Application of lining materials for lining skips // Izvestiya TulGU. 2024. Issue 4. pp. 196–208. (in Russian).

3 Titievsky E.M., Chizhik E.F. The concept of scientific, design and technological substantiation of the use of rubber linings in drum mills // Mining Journal. 2026. № 2. pp. 80–87. (in Russian).

4 Danilova S.N., Okhlopkova A.A., Okoneshnikova A.V. Development of composite materials based on UHMWPE and carbon and basalt fibers // Natural Resources of the Arctic and Subarctic. 2024. 29(4). pp. 661–674. DOI: 10.31242/2618–9712–2024–29–4–661–674. (in Russian).

5 Zhirikova Z.M., Aloev V.Z. Deformation and strength properties of oriented polymer composites based on ultrahigh molecular weight polyethylene. Izvestiya Kabardino-Balkaria State University. 2023. 13(2). pp. 17–20. DOI: 10.31143/2221–7789–2023–2–17–20. (in Russian).

6 Global and China ultrahigh molecular weight polyethylene (UHMWPE) industry. Report, 2019–2025 // MarketResearch.com. [electronic resource]. – 2025. – URL: https://www.marketresearch.com/Research-in-China-v3266/Global-China-Ultra-High-Molecular-12403936 (date of request: 11.11.2025).

7 Sergeeva E.A., Khubathuzin A.A., Dalovsky K.D. Wear-resistant material based on ultrahigh molecular weight polyethylene // Modern high-tech technologies. 2025. No. 5. pp. 74–79. DOI: 10.17513/snt.40393. (in Russian).

8 Panin S.V., Buslovich D.G., Dontsov Yu. V. et al. Two-component feedstock based on ultra-high molecular weight polyethylene for additive manufacturing of medical products // Advanced Industrial and Engineering Polymer Research. 2021. Vol. 4, № 4. P. 235–250. DOI: 10.1016/j.aiepr.2021.05.003.

9 Zabolotnova A.S., Gosteva S.S., Gudkov M.V. and others. The effect of ultra-low graphene content on the wear-resistant properties of composites based on ultrahigh molecular weight polyethylene. High molecular weight compounds. Series A. 2023. Vol. 65, No. 3. pp. 230–236. DOI: 10.31857/S2308112023700517

10 Grydunov S.S., Sivakov V.V. Assessment of wear resistance of working bodies of crushers // Mining Journal. 2024. № 12. pp. 71–75. DOI: 10.17580/gzh.2024.12.09. (in Russian).

11 Napolskikh S.A., Lipatov A.G., Furin V.O., Zhuravlev A.G. Improving the technology of primary crushing of ferruginous quartzites from the Stoilenskoye deposit using upgraded KKD-1500/180 gyration crushers. // Mining magazine. 2021. No.6. pp. 41–46. DOI: 10.17580/gzh.2021.06.02. (in Russian).

12 Chizhik E.F. New designs and technologies for the production of rubber linings for ball mills // Mining Journal. 2021. No.11. pp. 39–45. DOI: 10.17580/gzh.2021.11.05. (in Russian).

13 Kablov E.N., Laptev A.B., Prokopenko A.N., Gulyaev A.I. Relaxation of polymer composite materials under prolonged static load and climate (review) Part 1. Binders // Aviation materials and technologies. 2021. No. 4 (65). pp. 70–80. DOI: 10.18577/2713–0193–2021–0–4–70–80. (in Russian).

14 14 Nizin D.R., Nizina T.A., Pivkin N.A., Spirin I.P., Chibulaev I.A. The influence of moisture content on the climatic resistance of polymer materials // Ogarev-online. 2024. Vol. 12., No. 9. pp. 63–68. (in Russian).

15 Zyryanova Z.E., Krynina A.I., Stakhanova S.V. Analysis of products of thermooxidation degradation of polyethylene by IR-Fourier spectroscopy // Advances in chemistry and chemical technology. 2022. Vol. XXXVI, No. 8. pp. 34–37. (in Russian).

16 Kiseleva T. Yu., Kovaleva S.A., Grigorieva T.F. and others. Application of the differential scanning calorimetry method to study the stability of composite materials based on ultrahigh molecular weight polyethylene to electron beam irradiation // Journal of Physical Chemistry. 2021. Vol. 95, No. 5. pp. 678–685. DOI: 10.31857/S0044453721050174.

17 Sidorina A.I., Safronov A.M. Investigation of the resistance of carbon fibers to oxidation // Proceedings of VIAM. 2022. No. 7 (113). Art. 06. DOI: 10.18577/2307–6046–2022–0–7–63–73. (in Russian).

18 Gogoleva O.V., Petrova P.N., Fedorov A.L. Investigation of changes in the properties and structure of ultrahigh molecular weight polyethylene and its composite during full-scale exposure in Yakutia // Polzunovsky vestnik. 2025. No. 2. pp. 207–213. DOI: 10.31242/2618–9712–2025–30–2–337–346. (in Russian).

19 Tarasevich B.N. IR spectra of the main classes of organic compounds. Reference materials. Moscow: Lomonosov Moscow State University, 2012. 54 p. (in Russian).

20 Kazitsyna L.A., Kupletskaya N.B. Application of UV, IR and NMR spectroscopy in organic chemistry. – study. manual for chemical specialties of the University of Moscow: Higher School, 1971. 264 p. (in Russian).

21 Gardette M., Perthue A., Gardette J.L. et al. Photo – and thermal-oxidation of polyethylene: Comparison of mechanisms and influence of unsaturation content // Polymer Degradation and Stability. 2013. 98 (11). P. 2383–2390.

22 Nechaev D.V., Shvetsov O.V., Ermakov S.B. Assessment of degradation of pile polymer composite pipes under the influence of UV radiation, elevated temperature and humidity // Global Energy. 2025. Vol. 31, No. 1. pp. 136–145. DOI: 10.18721/JEST.31110. (in Russian).

23 Jiang C., Zhou J., Cui J., Shi J., Miao C. Fatigue analysis of spherulitic semi-crystalline polymers: Unveiling the effects of microstructure and defect // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2024, vol. 47, is. 11, pp. 4063–4080. doi: 10.1111/ffe.14405.

24 Gogoleva O.V., Sharin P.P., Petrova P.N. et al The development of high-strength wear-resistant composites based on uhmwpe and nanodiamonds // Inorganics Materials: Applied Research. 2024. Vol. 15. No. 1. pp. 183–189.

Сведения об авторах

Ольга В. Гоголева к.т.н., старший научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа СО РАН, лаборатория Материаловедение, Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», пр-т М. Николаева, 20, г. Якутск, 677007, Россия, oli-gogoleva@ya.ru
https://orcid.org/0000-0001-5425-2295

Павлина Н. Петрова к.т.н., ведущий научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа СО РАН, лаборатория Материаловедение, Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»), пр-т М. Николаева, 20, г. Якутск, 677007, Россия, ppavlina@ya.ru
https://orcid.org/0000-0002-1859-8034

Марина Д. Соколова д.т.н., главный научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа СО РАН, лаборатория Материаловедение лаборатория), Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», пр-т М. Николаева, 20, г. Якутск, 677007, Россия, marsokol@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-2306-5870

Андрей Л. Федоров к.т.н., старший научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа СО РАН, лаборатория Материаловедение, Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», пр-т М. Николаева, 20, г. Якутск, 677007, Россия, gelvirb@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-1718-2643

Борис Н. Заровняев д.т.н., профессор, Горный институт кафедра «Горное дело», Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова), ул. Кулаковского, 50, г. Якутск, 677016, Россия), mine_academy@mail.ru
https://orcid.org/0009-0000-3738-566x

Information about authors

Olga V. Gogoleva Cand. Sci. (Engin.), Senior Researcher,, Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, Materials Science Laboratory, Federal Research Center "Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences", M. Nikolaeva Av., 20 Yakutsk, 677007, Russia, oli-gogoleva@ya.ru
https://orcid.org/0000-0001-5425-2295

Pavlina N. Petrova Cand. Sci. (Engin.), Leading Researcher, Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, Materials Science Laboratory, Federal Research Center "Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences", M. Nikolaeva Av., 20 Yakutsk, 677007, Russia, ppavlina@ya.ru
https://orcid.org/0000-0002-1859-8034

Marina D. Sokolova Doct. Sci. (Engin.), Chief Scientific Officer, Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, Materials Science Laboratory, Federal Research Center "Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences", M. Nikolaeva Av., 20 Yakutsk, 677007, Russia, marsokol@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-2306-5870

Andrey L. Fedorov Cand. Sci. (Engin.), Senior Researcher, Institute of Oil and Gas Problems SB RAS, Materials Science Laboratory, Federal Research Center "Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences", M. Nikolaeva Av., 20 Yakutsk, 677007, Russia, gelvirb@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-1718-2643

Boris N. Zarovnyaev Doct. Sci. (Engin.), professor, Mining Institute, North-Eastern Federal University, Kulakovskaya St, 50 Yakutsk, 677016, Russia, mine_academy@mail.ru
https://orcid.org/0009-0000-3738-566x

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 29/07/2026	После редакции 01/08/2026	Принята в печать 10/08/2026
Received 29/07/2026	**Accepted in revised** 01/08/2026	Accepted 10/08/2026