



Оригинальная статья

Исследование изменения свойств СВМПЭ в натуральных условиях г. Якутск в зависимости от сезона экспонирования

Ксю М.¹, Гоголева О.В.^{✉,2}, Соколова М.Д.², Петрова П.Н.², Федоров А.Л.²,
Кондаков М.Н.², Чжан Д.¹

¹Высокотехнологичная промышленная база (промежуточных исследований) Шаньдунской Академии наук
(бизнес-инкубатор обучающихся за границей), Цзинань, Китай

²Институт проблем нефти и газа СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

✉oli-gogoleva@yandex.ru, 1225602976@qq.com

Аннотация

В работе приведены результаты сравнительных исследований физико-механических свойств сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) и модифицированных полимерных композиционных материалов (ПКМ) после стендовых натуральных испытаний на климатическом полигоне в г. Якутск, проведенных в марте и в октябре. Исследования физико-механических показателей экспонированных образцов проводились через 30, 105, 135, 180, 270 и 365 дней. Выявлено, что старение образцов СВМПЭ приходится на летние месяцы, независимо от сезона выставления. Рассмотрены изменения физико-химической структуры методом ИК-спектроскопии. Установлена интенсификация процессов фотохимической деструкции СВМПЭ в присутствии углеродных волокон. Проведены расчеты температур поверхности образцов при облучении солнечной радиацией в условиях натурной экспозиции в г. Якутск, используя линейную регрессионную модель для оценки температуры поверхности материалов с покрытиями разного цвета.

Получены новые данные о влиянии климатических факторов Якутии на изменение деформационно-прочностных свойств СВМПЭ. Установлены механизмы воздействия факторов окружающей среды: температуры, солнечной радиации, сезона экспонирования на процессы старения СВМПЭ и его композитов. Результаты получат развитие в полимерном материаловедении для решения вопросов по снижению старения полимеров. На основании проведенных работ композиционные материалы на основе СВМПЭ, предназначенные для работы под открытым воздухом в условиях Якутии, например футеровки, рекомендуется дополнительно модифицировать эффективными стабилизаторами с целью предотвращения процессов светового старения.

Ключевые слова: сверхвысокомолекулярный полиэтилен, старение, деградация, солнечная активность, температура

Благодарности. Данная работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ №122011100162-9 с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук».

Для цитирования: Ксю М., Гоголева О.В., Соколова М.Д., Петрова П.Н., Федоров А.Л., Кондаков М.Н., Чжан Д. Исследование изменения свойств СВМПЭ в натуральных условиях г. Якутск в зависимости от сезона экспонирования. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(2):337–346. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-2-337-346>

Original article

Study of the changes in the properties of UHMWPE under the natural environmental conditions of Yakutsk based on seasonal exposure

Mingxian Xu¹, Olga V. Gogoleva^{✉,2}, Marina D. Sokolova², Pavlina N. Petrova²,
Andrey L. Fedorov², Mikhail N. Kondakov², Daifeng Jiang¹

¹The Science of Technology Service Platform of Shandong Academy of Sciences
(Shandong Academy of Sciences Overseas Chinese Entrepreneurship Park), Jinan, China

²Institute of Oil and Gas Problems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

✉oli-gogoleva@yandex.ru, 1225602976@qq.com

Abstract

This research presents the results of comparative analyses of the physical and mechanical properties of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) and modified polymer composite materials (PCMs) following field bench

testing. These analyses were conducted at a climatic testing facility in Yakutsk during March and October. The study examined changes in the physical and mechanical properties of the samples after exposure durations of 30, 105, 135, 180, 270, and 365 days. The findings indicate that the aging process of UHMWPE predominantly occurs during the summer months, despite variations associated with seasonal changes. Infrared (IR) spectroscopy was utilized to investigate modifications in the physicochemical structure of the materials. A notable acceleration in the photochemical degradation of UHMWPE was observed in the presence of carbon fibers. Additionally, surface temperature calculations for samples exposed to solar radiation under real-world conditions in Yakutsk were performed using a linear regression model. This model was employed to evaluate the surface temperatures of materials with varying colored coatings. The study elucidates the mechanisms by which environmental variables, including temperature, solar radiation, and seasonal exposure, affect the aging processes of UHMWPE and its composites in Yakutia. The results are expected to have significant implications for addressing challenges related to the mitigation of polymer aging. Consequently, it is recommended to further enhance UHMWPE composite materials intended for outdoor applications in Yakutia, such as linings, by incorporating effective stabilizers to reduce light-induced aging effects.

Keywords: ultra-high molecular weight polyethylene, aging, degradation, solar activity, temperature

Funding. This study was conducted within the state assignment from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (No. 122011100162-9), using the scientific equipment available at the Core Shared Research Facilities of the Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.”

For citation: Xu M., Gogoleva O.V., Sokolova M.D., Petrova P.N., Fedorov A.L., Kondakov M.N., Jiang D. Study of the changes in the properties of UHMWPE under the natural environmental conditions of Yakutsk based on seasonal exposure. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(2):337–346. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-2-337-346>

Введение

В условиях реальной эксплуатации полимерные изделия подвергаются воздействию климатических факторов (температура, влажность, атмосферное давление, осадки, солнечная радиация, ветер и т. д.), абразивных частиц (пыль, песок), ветер и т. д. и эксплуатационных нагрузок (растягивающие и сжимающие напряжения, вибрация, трение, изменение внешнего давления, деформация, удары и др.), и эти воздействия приводят к интенсификации процессов старения, деструкции и разрушения полимерных материалов, что существенно влияет на их работоспособность.

Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) обладает широким спектром ценных функциональных свойств и в настоящее время является перспективным материалом для применения в аэрокосмической области, строительстве, машиностроении в качестве триботехнических деталей, уплотнений, для футеровки бункеров, кузовов, вагонов и конструкций в горнорудной промышленности, медицинских изделиях, бронезащитных материалах, спортивной индустрии и т. п. [1–5]. Изделия из СВМПЭ характеризуются низким коэффициентом трения, высокой износостойкостью, кроме этого, они обладают высокой стойкостью к действию агрессивных сред и повышенной морозостойкостью [6–9]. Однако ранее проведенные исследования климатической стойкости СВМПЭ и композитов на его основе с углеродными волокнами показали, что при натурной экспозиции в условиях г. Якутск

под действием света, кислорода, влажности, перепада температур они подвергаются в основном световому старению, приводящему к фотохимической деструкции полимерных цепей или их нежелательному, неконтролируемому сшиванию, в результате чего в течение 3–6 месяцев они становятся хрупкими и жесткими [10].

Материалы и методы исследований

В качестве полимерной матрицы использовали СВМПЭ марки Gur-4150 с молекулярной массой 9,2 млн. В качестве армирующего наполнителя использованы дискретные углеродные волокна (УВ) марки «Белум». Переработку СВМПЭ и композиций на его основе проводили с использованием технологии горячего прессования при давлении 10 МПа и температуре 180 °С.

Экспериментальные исследования проводили на образцах полимерных материалов и ПКМ в виде прессованных деталей. Предел прочности при растяжении, относительное удлинение при разрыве, модуль упругости определяли по ГОСТ 11262-2017 на испытательной машине “UTS-20K”.

Метод инфракрасной спектроскопии использован для изучения изменений физико-химической структуры ПКМ. ИК-спектры образцов ПКМ регистрировали методом неполного внутреннего отражения на спектрометре Varian FTIR 7000 Spectrometer в области частот 400–4000 см⁻¹. Идентификацию и анализ ИК-спектров осуществляли по известным методикам с использованием библиотеки спектрометра и данных по ИК-спектрам полимеров.

Исследование изменения основных свойств композитов при естественном старении в климатических условиях, характерных для г. Якутск, проводили по ГОСТ 9.708-83.

Обсуждение результатов

Для дополнительного подтверждения, что доминирующим механизмом старения являются процессы фотохимической деструкции, проведены сравнительные исследования изменения свойств СВМПЭ, экспонированных в разные сезоны, сильно различающихся значениями суммарной солнечной радиации. В связи с тем, что ранее проведенные климатические испытания СВМПЭ были начаты в марте 2021 г., когда начинает повышаться прямая солнечная радиация, как рекомендовано в ГОСТ 9.708-83, для сравнительного эксперимента образцы СВМПЭ для натурной экспозиции выставлены в октябре 2022 г., в период ее снижения (рис. 1).

На рисунках 2 и 3 приведены изменения деформационно-прочностных показателей образцов СВМПЭ в зависимости от сезона экспонирования. Время экспонирования в обоих случаях – 1 год.

Как видно из рис. 2, судя по изменению значений относительного удлинения при разрыве экспонированных образцов СВМПЭ, процесс старения существенно зависит от температуры окружающего воздуха и солнечной активности. У образцов, выставленных в марте, когда солнечная активность начинает возрастать, процесс

изменения деформационно-прочностных характеристик, в особенности относительного удлинения при разрыве, идет в сторону повышения. Максимальные значения относительного удлинения зарегистрированы у СВМПЭ в июне, когда достигается пик значений средних за месяц суточных сумм прямой радиации. Видимо, это связано с релаксацией внутренних напряжений и перестройкой надмолекулярной структуры полимерной матрицы под воздействием УФ-излучения и температуры. На 135 день (июль) экспонирования зарегистрирован резкий спад относительного удлинения при разрыве, происходит хрупкое разрушение образца. Это можно связать с тем, что в июне и июле увеличиваются продолжительность солнечного сияния (12,5 и 10,8 часов соответственно) и суточные суммы прямой радиации (см. рис. 1), приводящие к интенсификации процессов старения. Повышение температуры окружающего воздуха в этот период также способствует ускорению процессов фотохимической деструкции полимерной матрицы вплоть до разрушения материала.

Также низкая климатическая стойкость СВМПЭ может быть связана с процессами получения, так как синтез СВМПЭ производится с применением катализаторов циглеровского типа, содержащих в своем составе хлориды титана и магния. Реакции окисления полимера ускоряются в присутствии света или в присутствии ионов металлов, так как технически получение «абсолютно

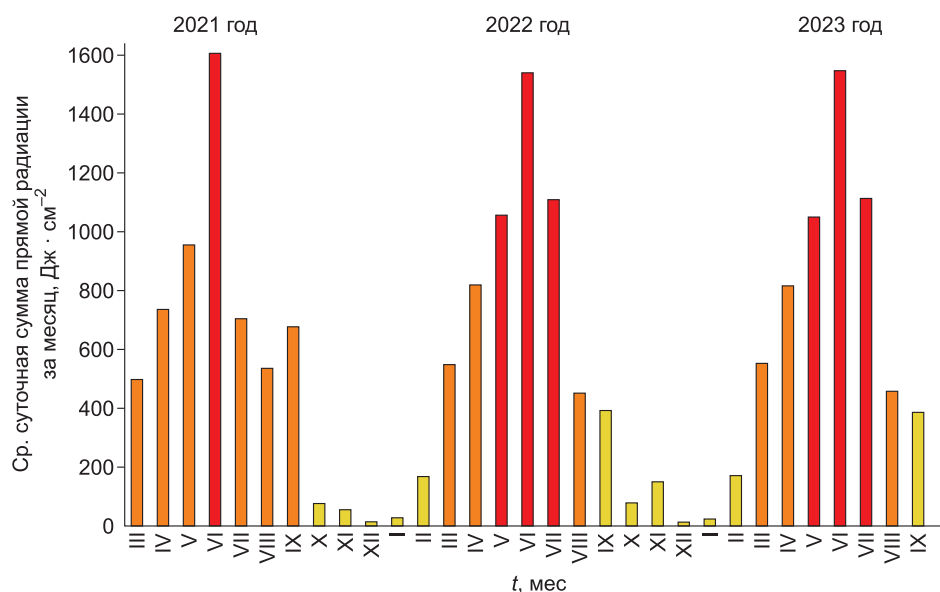


Рис. 1. Значения средних за месяц суточных сумм прямой радиации [11]

Fig. 1. Monthly average daily totals of direct solar radiation [11]

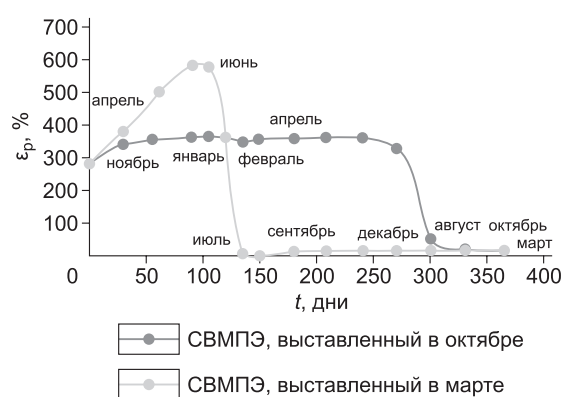


Рис. 2. Значения относительного удлинения при разрыве СВМПЭ в зависимости от сезона экспонирования

Fig. 2. Values of elongation at break of UHMWPE based on the exposure season

чистого» полимера просто невозможно и в полимере могут присутствовать дефекты структуры и примеси в виде остатков катализаторов, содержащих ионы металлов [12, 13].

У СВМПЭ, экспонированного в октябре, процесс старения носит сначала после первого месяца экспонирования установившийся характер, т. е. в течение 9 мес. не наблюдается сильного изменения механических свойств. Затем на 10-й месяц экспонирования (август) у образца наблюдается резкое снижение значения относительного удлинения при разрыве. Характер деформационной кривой от нагрузки образца СВМПЭ после экспонирования в течение 10 месяцев соответствует хрупкому разрушению (рис. 4).

Таким образом, из рис. 4 видно, что изменения механизма разрушения (переход от пластич-

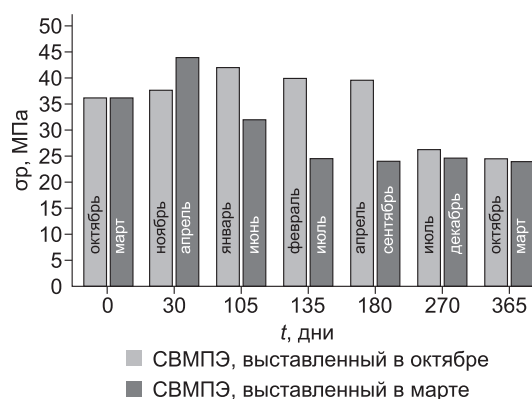


Рис. 3. Значения предела прочности при растяжении СВМПЭ в зависимости от сезона экспонирования

Fig. 3. Tensile strength values of UHMWPE based on the exposure season

ного к хрупкому разрушению) образцов СВМПЭ приходится на летние месяцы июнь–июль, в которых солнечная активность и температура окружающего воздуха г. Якутск максимальны. В эти месяцы активизируются окислительно-деструктивные процессы в поверхностном слое экспонированных образцов, процессы диффузии и растворения кислорода происходят преимущественно в аморфных областях. Механические свойства полиолефинов в значительной степени определяются зацеплениями проходных молекул, поэтому окисление в аморфных областях быстро приводит к снижению деформационно-прочностных характеристик [14].

В работах [15, 16] была показана перспективность использования углеродных волокон (УВ) марки «Белум», полученных из гидратцеллю-

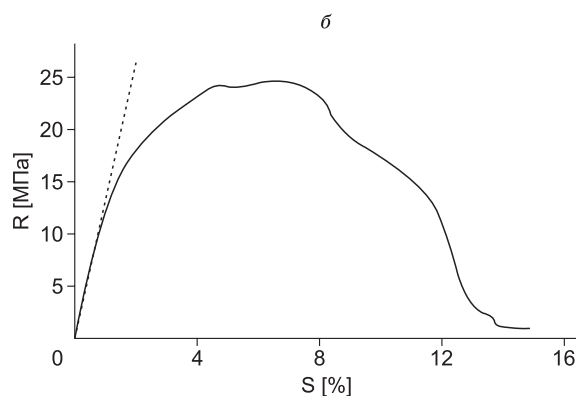
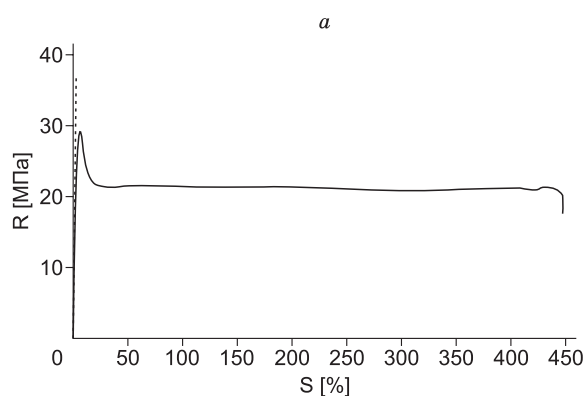


Рис. 4. Характер деформационной кривой от нагрузки: а – СВМПЭ, экспонированный 9 месяцев; б – СВМПЭ, экспонированный 10 месяцев

Fig. 4. The deformation curve in response to the load: а – UHMWPE exposed for 9 months; б – UHMWPE exposed for 10 months

лозного сырья в качестве армирующего элемента СВМПЭ. Установлено, что наполнение углеродными волокнами сверхвысокомолекулярного полиэтилена приводит к улучшению триботехнических свойств композитов с сохранением физико-механических свойств на уровне исходного полимера.

Однако, было выявлено, что при натурном экспонировании в условиях г. Якутск ПКМ, модифицированные углеродными волокнами, быстрее подвергаются процессам старения, чем немодифицированный СВМПЭ [10]. Это связано с тем, что углеродный наполнитель марки «Белум» представляет собой углеродные волокна, получаемые путем термической обработки целлюлозных волокон в инертной атмосфере. На рис. 5 представлена структурная формула целлюлозы. Как видно, она имеет в своем составе множество $-\text{CH}_2-\text{OH}$ -групп, часть из которых, вероятно, сохраняется при термической обработке целлюлозы и выступает как хромофорные группы, способные поглощать УФ-излучение, находясь уже в составе ПКМ. Наличие хромофорных групп способствует интенсификации процессов фотохимической деструкции полимерной матрицы [6].

Интенсификация фотохимической деструкции СВМПЭ в присутствии УВ марки «Белум» подтверждается ИК-спектроскопическими исследованиями (рис. 6). Интенсивность полосы поглощения при 1712 см^{-1} , относящейся к карбонильным группам, свидетельствуют

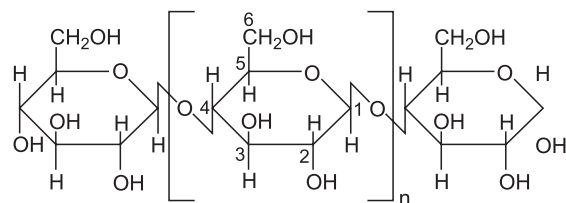


Рис. 5. Структурная формула целлюлозы

Fig. 5. The structural formula of cellulose

щей о протекании окислительных процессов с участием кислорода воздуха, инициированных УФ-частью спектра солнечного излучения, на спектрах ПКМ выше по сравнению с исходным СВМПЭ.

С другой стороны, УВ являются адсорберами ультрафиолетового излучения, т. е. поглощают энергию ультрафиолетового и видимого света практически во всем частотном диапазоне и преобразуют преимущественно в тепло. В работе [17] обсуждается эффект перегрева поверхности образцов ПКМ, вызванный солнечным излучением. Показано, что даже с учетом ночного времени, при котором не происходит нагрев солнечными лучами, среднесуточная температура образцов может превысить среднегодовую температуру более чем на $30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В связи с этим проведены расчеты температур поверхности образцов при облучении солнечной радиацией в условиях натурной экспозиции в г. Якутск, используя линейную регрессионную модель для оценки температуры поверхности ма-

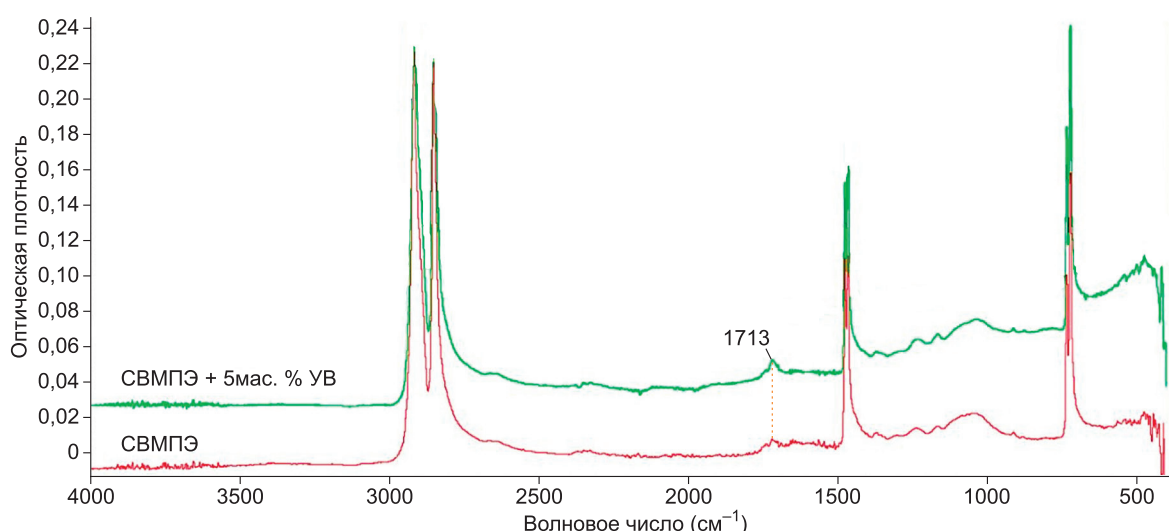


Рис. 6. ИК-спектры СВМПЭ и СВМПЭ + 5 мас. % УВ, экспонированных в течение 12 месяцев

Fig. 6. IR spectra of UHMWPE and UHMWPE containing 5 wt. % hydrocarbons after 12 months of exposure

териалов T_s с покрытиями разного цвета, представленную в работе [18]:

$$T_s = T_a + \frac{a \cdot I_{UV}}{h},$$

где T_a – максимальная температура воздуха; a – коэффициент поглощения солнечной радиации (для белых образцов СВМПЭ 0,2, для черных образцов ПКМ – 0,9); I_{UV} – интенсивность солнечной радиации для ультрафиолетового излучения; h – коэффициент теплопроводности материала (Вт/(м·К)).

Интенсивность солнечной радиации (Вт/м²) вычисляли по формуле

$$I = \frac{M \cdot 10000}{T \cdot 3600},$$

где M – средние значения за месяц суточной суммы прямой радиации, Дж/см², T – средние значения за месяц суточной суммы продолжительности солнечного сияния, ч.

Средние значения за месяц суточной суммы прямой радиации вычисляли по формуле

$$M = M_G - M_D,$$

где M_G – средние значения за месяц суточной суммы суммарной радиации (Дж/см²), M_D – средние значения за месяц суточной суммы рассеянной радиации (Дж/см²) [11].

Коэффициент теплопроводности исходного СВМПЭ принимался равным 0,42 Вт/(м·К), для композита коэффициент теплопроводности равен 0,93 Вт/(м·К). Рассчитан согласно уравнению Максвелла для двухфазных систем [19].

Далее учитываем долю ультрафиолетового излучения (350 нм) от всего солнечного спектра, где она может варьировать в зависимости от климатических условий от 1 до 9 % [20, 21]. В данном случае для образцов, экспонированных в условиях Якутии, доля УФ-излучения принята равной 7 % на основе анализа суммарной солнечной радиации (МДж/м²) по регионам РФ [7]. С учетом этого интенсивность ультрафиолетового излучения составляет

$$I_{UV} = I \cdot 0,07.$$

На рис. 7 представлены рассчитанные значения температур на поверхности образцов ΔT при доле УФ-излучения 7 %. В летние месяцы зарегистрирован эффект перегрева поверхности образцов ПКМ.

Видно, что для белых образцов СВМПЭ наибольшая разность температур окружающего воздуха и на поверхности образцов фиксируется в июне и составляет 11,4 °С, для черных образцов ПКМ – 23,2 °С, что согласуется с выводами работы [22]. Основываясь на данных вычислениях, проведены

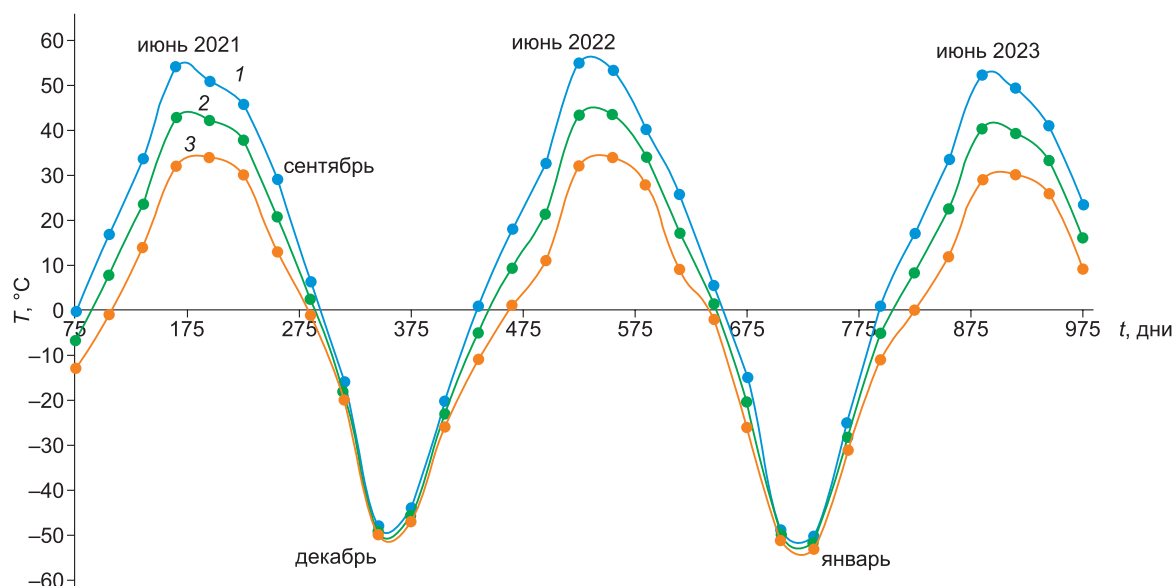


Рис. 7. Показатели вычисленных значений температур на поверхности образцов СВМПЭ с УФ и без: 1 – ПКМ (черные образцы); 2 – СВМПЭ (белые образцы); 3 – температура окружающего воздуха

Fig. 7. Indicators of the calculated temperature values on the surface of the samples: UHMWPE with and without CF: 1 – PCM (black samples); 2 – UHMWPE (white samples); 3 – ambient air temperature

испытания физико-механических свойств СВМПЭ и ПКМ при температурах 50 и 60 °С (см. таблицу).

Показано, что чем выше температура проведения эксперимента, тем выше показатели относительного удлинения при разрыве, что объясняется увеличением сегментальной подвижности макромолекул и облегчением протекания релаксационных процессов. Зарегистрировано, что по мере повышения температуры прочность у СВМПЭ и ПКМ снижается. Это связано с тем, что разрушение полимерных образцов при растяжении происходит не только под действием нагрузки, но и в значительной степени в результате теплового движения сегментов макромолекул. Вследствие флуктуации тепловой энергии происходит разрушение межмолекулярных связей, обеспечивающих прочность материала, а деформирующее напряжение существенно уменьшает энергетический барьер, и это способствует снижению разрывной прочности образцов [23–25].

Заключение

На основании проведенных исследований получены новые данные о влиянии климатических факторов Якутии на изменение деформационно-

Физико-механические показатели образцов в зависимости от температуры

Physical and mechanical properties of samples depending on temperature

T, °C	Образцы	ε_p , %	σ_p , МПа	E, МПа
23	СВМПЭ	280	36,0	810
	СВМПЭ + 5 мас. % УВ	290	36,0	863
50	СВМПЭ	400	30,4	508
	СВМПЭ + 5 мас. % УВ	360	28,2	570
60	СВМПЭ	410	27,3	316
	СВМПЭ + 5 мас. % УВ	395	26,5	475

прочностных свойств СВМПЭ. Установлены механизмы воздействия факторов окружающей среды: температуры, солнечной радиации, влияния сезона экспонирования на процессы старения СВМПЭ и его композитов.

Композиционные материалы на основе СВМПЭ, предназначенные для работы под открытым воздухом в условиях Якутии, например футеровки, рекомендуется дополнительно модифицировать эффективными стабилизаторами с целью предотвращения процессов светового старения.

Список литературы / References

1. Валуева М.И. Современные материалы и технологии для получения бронезащитных изделий. *Вопросы материаловедения*. 2017;(2):197–207.
1. Valueva M.I. Modern materials and technologies used for body armor. *Voprosy Materialovedeniya*. 2017;(2):197–207 (In Russ.).
2. Валуева М.И., Железина Г.Ф., Гуляев И.Н. Полимерные композиционные материалы повышенной износостойкости на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена. *Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2017;(6):23–29.
2. Valueva M.I., Zhelezina G.F., Gulyaev I.N. Polymer composite materials with increased wear resistance based on ultra-high molecular weight polyethylene. *All Materials. Encyclopedic Reference Book*. 2017;(6):23–29 (In Russ.).
3. Михайлин Ю.А. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (часть 1). *Полимерные материалы*. 2003;(3):18–21.
3. Mikhailin Yu.A. Ultra-high molecular weight polyethylene (part 1). *Polymer materials*. 2003;(3):18–21. (In Russ.).
4. Колесова Е.С., Гоголева О.В., Петрова П.Н., Протопопов Ф.Ф. Исследование работоспособности сверхвысокомолекулярного полиэтилена при трении в среде различных смазочных масел. *Нефтегазовое дело*. 2021;19(4):97–106. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2021-4-97-106>.
4. Research Ultra-High Molecular Weight Polyethylene performance at friction in the medium of various lubricating oils. *Petroleum Engineering*. 2021;19(4):97–106. (In Russ.). <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2021-4-97-106>.
5. Сенатов Ф.С. Микроструктура и свойства композитов медицинского назначения на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М. 2013. 158 с.
5. Senatov F.S. *Microstructure and properties of medical grade composites based on ultra-high molecular weight polyethylene*: Diss. ... Cand. Sci. Moscow. 2013. 158 p. (In Russ.).
6. 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):661–674. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-4-661-674>
6. Danilova S.N., Okhlopko A.A., Okoneshnikova A.V. Development of composite materials based on UHMWPE using carbon and basalt fibers. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(4):661–674 (In Russ.). <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-4-661-674>
7. Борисова Р.В., Никифоров Л.А., Спиридонов А.М., et al. Brominated UHMWPE influence on tribological characteristics and wearing features of polymeric nanocomposites based on UHMWPE and nanoparticles. *Journal of Friction and Wear*. 2019;40:27–32. <https://doi.org/10.3103/S1068366619010045>

8. Дайюб Т., Максимкин А.В. Влияние химической модификации на механические, трибологические и адгезионные свойства ориентированных лент СВМПЭ. *Машиностроение*. 2024;11(2):86–91. <https://doi.org/10.24892/RIJE/20240214>
- Dayyub T., Maksimkin A.V. Influence of chemical modification on mechanical, tribological and adhesive properties of oriented UHMWPE tapes. *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*. 2024;11(2):86–91 (In Russ.). <https://doi.org/10.24892/RIJE/20240214>
9. Спиридонов А.М. *Адсорбция цетилтриметиламмоний бромида природным цеолитом и свойства его модифицированной поверхности*: Дис. ... канд. хим. наук. Якутск. 2021. 115 с.
- Spiridonov A.M. *Adsorption of cetyltrimethylammonium bromide by natural zeolite and properties of its modified surface*: Diss. ... Cand. Sci. Yakutsk. 2021. 115 p. (In Russ.).
10. 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;26(4):122–131. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-4-122-131>.
- Kolesova E.S., Gogoleva O.V., Petrova P.N. Development of polymer composite materials based on Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene with the high stability of characteristics under the conditions of sharply continental climate. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2021;26(4):122–131 (In Russ.). <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2021-26-4-122-131>.
11. Мировой Центр Радиационных Данных [Электронный ресурс]. 2023. Режим доступа: https://wrdc.mgo.rssi.ru/wwwrootnew/wrdc_ru_new.htm (дата обращения: 23.11.2023).
- World Radiation Data Center [Electronic resource]. 2023. Available at: https://wrdc.mgo.rssi.ru/wwwrootnew/wrdc_ru_new.htm (accessed: 23.11.2023).
12. Гостев С.С. *Реакторные полимерные композиции сверхвысокомолекулярного полиэтилена с низкомолекулярным полиэтиленом высокой плотности: синтез на металлоценовых и пост-металлоценовых катализаторах, морфология, свойства*. Дис. ... канд. хим. наук. М. 2023. 141 с.
- Gostev S.S. *Reactor polymer compositions of ultrahigh molecular weight polyethylene with low molecular weight high-density polyethylene: synthesis on metallocene and post-metallocene catalysts, morphology, properties*. Diss. ... Cand. Sci. Moscow. 2023. 141 p. (In Russ.).
13. Stein H.L. *Ultrahigh molecular weight polyethylenes (UHMWPE)*. In: *Engineered materials handbook*. 1998;(2):167 p.
14. Мельникова М.А. *Полимерные материалы: свойства, практическое применение: учебное пособие*. Благовещенск: Амурский гос. ун-т; 2013. 86 с.
- Melnikova M.A. *Polymer materials: properties, practical application: textbook*. Blagoveshchensk: Amur State University; 2013. 86 p. (In Russ.).
15. Gogoleva O.V., Petrova P.N., Kolesova E.S. Development of polymer composite materials based on Ultrahigh-Molecular Weight Polyethylene and Carbon Fillers. *Materials Science Forum*. 2019;(945):362–368.
16. Колесова Е.С., Гоголева О.В., Петрова П.Н. и др. Разработка композитов триботехнического назначения на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена. *Материаловедение*. 2020;(9):34–37. <https://doi.org/10.31044/1684-579X-2020-0-9-34-37>.
- Kolesova E.S., Gogoleva O.V., Petrova P.N., et al. Development of composites for tribotechnical purposes, based on Ultrahigh-Molecular Weight Polyethylene. *Materials Science*. 2020;(9):34–37. (In Russ.). <https://doi.org/10.31044/1684-579X-2020-0-9-34-37>.
17. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. III. Значимые факторы старения. *Деформация и разрушение материалов*. 2011;(1):34–40.
- Kablov E.N., Startsev O.V., Krotov A.S., Kirillov V.N. Climatic aging of composite materials for aviation purposes. III. Significant aging factors. *Deformatsiya i Razrushenie materialov=Deformation and Fracture of Materials*. 2011;(1):34–40 (In Russ.).
18. Fisher R.M., Ketola W.D. Surface temperatures of materials in interior exposures and accelerated tests. In: Ketola W.D., Grossman D. (eds.) *Accelerated and Outdoor Durability Testing of Organic Materials*. Philadelphia, USA; 1994, pp. 88–114.
19. Shi W., Dong H., Bell T. Tribological behaviour and microscopic wear mechanisms of UHMWPE sliding against thermal oxidation-treated Ti₆Al₄V. *Materials Science and Engineering*. 2000;29(1-2):27–36.
20. Diffey B. L. Sources and measurement of ultraviolet radiation. *Methods*. 2002;28(1):4–13. [https://doi.org/10.1016/s1046-2023\(02\)00204-9](https://doi.org/10.1016/s1046-2023(02)00204-9).
21. Wolf A.T. Environmental degradation factors, their characterization and effects on sealed building joints. In: Wolf A.T. (ed.) *Durability of Building Sealants. State-of-the-Art Report of RILEM TC 139-DBS*; Cachan: RILEM Publications; 1999, pp. 41–72.
22. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Измерение и прогнозирование температуры образцов материалов при экспонировании в различных климатических зонах. *Авиационные материалы и технологии*. 2020;(4-61):47–58. <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2020-0-4-47-58>
- Kablov E.N., Startsev V.O. Measurement and forecasting of materials samples' temperature during weathering in different climatic zones. *Aviation Materials and Technologies*. 2020;(4-61):47–58 (In Russ.). <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2020-0-4-47-58>
23. Шевченко А.А. *Химическое сопротивление неметаллических материалов и защита от коррозии*. М.: Химия, КолосС; 2004. 248 с.
- Shevchenko A.A. *Chemical resistance of non-metallic materials and corrosion protection*. Moscow: Khimiya, KolosS; Publ.; 2004. 248 p. (In Russ.).

24. Кулезнев В.Н., Шершнева В.А. *Химия и физика полимеров*. М.: Химия, Колосс; 2007. 367 с.

Kuleznev V.N., Shershnev V.A. *Chemistry and physics of polymers*. Moscow: Khimiya, KolosS Publ.; 2007. 367 p (In Russ.).

25. Тагер А.А. *Физико-химия полимеров*. Москва: Химия; 1968. 536 с.

Tager A.A. *The physical and chemical properties of polymers*. Moscow: Khimiya Publ.; 1968. 536 p. (In Russ.).

Об авторах

КСЮ Мингсян, профессор, заместитель директора, <https://orcid.org/0009-0009-9422-9298>, Scopus Author ID: 58069441600, e-mail: 1225602976@qq.com

ГОГОЛЕВА Ольга Владимировна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-5425-2295>, ResearcherID: A-5450-2014, Scopus Author ID: 13905668500, SPIN: 9737-9437, e-mail: oli-gogoleva@yandex.ru

СОКОЛОВА Мария Дмитриевна, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-2306-5870>, ResearcherID: A-5266-2014, Scopus Author ID: 56896257700, SPIN: 7603-7126, e-mail: marsokol@mail.ru

ПЕТРОВА Павлина Николаевна, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-1859-8034>, ResearcherID: A-6427-2014, Scopus Author ID: 13906602000, SPIN: 4704-0089, e-mail: ppavlina@yandex.ru

ФЕДОРОВ Андрей Леонидович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-1718-2643>, ResearcherID: A-5442-2014, Scopus Author ID: 55845420304, SPIN: 6079-2229, e-mail: gelvirb@mail.ru

КОНДАКОВ Михаил Николаевич, кандидат технических наук, научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-9771-7427>, ResearcherID: AAZ-8507-2020, Scopus Author ID: 57193235069, SPIN: 2340-6526, e-mail: kondakovmix@mail.ru

ЧЖАН Дайфен, PhD, ассистент профессора, <https://orcid.org/0009-0003-3019-0060>, Author ID: 55847205900, e-mail: lichenjdf@lzb.com

Вклад авторов

Ксю М. – администрирование проекта; **Гоголева О.В.** – разработка концепции, методология, администрирование данных, визуализация, создание черновика рукописи; **Соколова М.Д.** – администрирование проекта; **Петрова П.Н.** – редактирование рукописи, руководство исследованием, администрирование проекта; **Федоров А.Л.** – верификация данных, проведение исследования, проведение статистического анализа; **Кондаков М.Н.** – верификация данных, проведение исследования, проведение статистического анализа; **Чжан Д.** – верификация данных, проведение статистического анализа.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

XU Mingxian, Associate Professor, Chief Sector, <https://orcid.org/0009-0009-9422-9298>, Scopus Author ID: 58069441600, e-mail: 1225602976@qq.com

GOGOLEVA, Olga Vladimirovna, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-5425-2295>, ResearcherID: A-5450-2014, Scopus Author ID: 13905668500, SPIN: 9737-9437, e-mail: oli-gogoleva@yandex.ru

SOKOLOVA, Marina Dmitrievna, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Chief Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-2306-5870>, ResearcherID: A-5266-2014, Scopus Author ID: 56896257700, SPIN: 7603-7126, e-mail: marsokol@mail.ru

PETROVA, Pavlina Nikolaevna, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-1859-8034>, ResearcherID: A-6427-2014, Scopus Author ID: 13906602000, SPIN: 4704-0089, e-mail: ppavlina@yandex.ru

FEDOROV, Andrey Leonidovich, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-1718-2643>, ResearcherID: A-5442-2014, Scopus Author ID: 55845420304, SPIN: 6079-2229, e-mail: gelvirb@mail.ru

KONDAKOV, Mikhail Nikolaevich, Cand. Sci. (Eng.), Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-9771-7427>, ResearcherID: AAZ-8507-2020, Scopus Author ID: 57193235069, SPIN: 2340-6526, e-mail: kondakovmix@mail.ru

JIANG Daifeng, PhD, Assistant Professor, <https://orsid.org/0009-0003-3019-0060>, <https://orsid.org/0009-0003-3019-0060>, Author ID: 55847205900, e-mail: lichenjdf@lzb.com

Authors' contribution

Xu M. – project administration; **Gogoleva O.V.** – conceptualization, methodology, data curation, visualization, writing – original draft; **Sokolova M.D.** – project administration; **Petrova P.N.** – writing – review & editing, supervision, project administration; **Fedorov A.L.** – validation, investigation, formal analysis; **Kondakov M.N.** – validation, investigation, formal analysis; **Jiang D.** – validation, formal analysis

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 25.06.2024

Поступила после рецензирования / Revised 27.02.2025

Принята к публикации / Accepted 14.03.2025

Редактор *Н.А. Лившиц*
Корректурa *З.А. Корнилова*
Компьютерная верстка *И.В. Мелехов*
Обложка *Б.В. Яковлев*

Дата выхода в свет 30.06.2025. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая
Усл. п.л. 19,75. Тираж 100 экз. Заказ № 2171. Цена свободная.

Адрес редакции:

677007, г. Якутск, пр. Ленина, 33, тел. 8(4112) 33-57-11, <https://resar.elpub.ru>

Адрес издателя:

677007, г. Якутск, пр. Ленина, 33, ГБУ «Академия наук Республики Саха (Якутия)»,
тел. 8(4112) 33-57-11, e-mail: anrsya@mail.ru

Адрес типографии:

ООО «Компания «Дани-Алмас»
677008, г. Якутск, ул. Билибина, д. 10А
тел. 8(4112) 36-93-38, e-mail: ardah@inbox