



Научная статья

УДК 678

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31110>



Д.В. Нечаев  , О.В. Швецов, С.Б. Ермаков

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

 nechaev_dv@spbstu.ru

ОЦЕНКА ДЕГРАДАЦИИ СВАЙНЫХ ПОЛИМЕРНО-КОМПОЗИТНЫХ ТРУБ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ УФ-ИЗЛУЧЕНИЯ, ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ

Аннотация. В настоящей работе было рассмотрено комплексное влияние ультрафиолета (УФ), повышенной температуры и влажности на механические свойства материала свайной трубы из полимерно-композитных материалов (ПКМ) на основе полиэфирной смолы, армированной базальтовым волокном и изготовленной методом мокрой намотки. Показано, что УФ является одним из значимых факторов, влияющих на работоспособность ПКМ-свай. Длительное воздействие УФ-излучения приводит к снижению прочностных свойств и деформационной способности ПКМ. Так, снижение прочностных свойств ПКМ на 20% возникает при УФ-экспозиции в течение 6100 часов. Причиной деградации механических свойств ПКМ под действием УФ-излучения является обширная поверхностная эрозия, приводящая к микрорастескиванию полиэфирной основы ПКМ с последующим образованием поверхностных и подповерхностных дефектов.

Ключевые слова: ПКМ, УФ-излучение, деградация материала, ресурс материала, климатические испытания, прогнозная модель, климатические факторы старения.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания «Разработка моделей деградации служебных свойств металлических и композиционных материалов для строительства в условиях многолетнемерзлых грунтов» (FSEG-2024-0009).

Для цитирования:

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: <https://doi.org/10.18721/JEST.31110>



D.V. Nechaev , O.V. Shvetsov, S.B. Ermakov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
St. Petersburg, Russia

nechaev_dv@spbstu.ru

ASSESSMENT OF DEGRADATION OF PILE POLYMER COMPOSITE PIPES UNDER THE INFLUENCE OF UV RADIATION, ELEVATED TEMPERATURE AND HUMIDITY

Abstract. This article examines the combined effects of ultraviolet (UV) radiation, elevated temperature and humidity on the mechanical properties of the pile pipe made of polymer-composite materials (PCM) based on polyester resin reinforced with basalt fiber and manufactured by the wet winding method. It is shown that UV radiation is one of the significant factors affecting the performance of PCM piles. Long-term exposure to UV radiation leads to a decrease in the strength properties and deformation capacity of PCM. Thus, a 20% decrease in strength properties occurs with UV exposure for 6100 hours. The cause of degradation of the mechanical properties of PCM under the influence of UV radiation is extensive surface erosion, leading to microcracking of the polyester base of the PCM with the subsequent formation of surface and subsurface pores.

Keywords: PCM, UV radiation, material degradation, material resource, climatic tests, predictive model, climatic factors of aging.

Acknowledgements: The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment “Development of models for the degradation of service properties of metal and composite materials for construction in permafrost conditions” (FSEG-2024-0009).

Citation:

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, 31 (01) (2025) 136–145, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.31110>

Введение. Использование полимерно-композитных материалов (ПКМ) в качестве несущих конструкций при обустройстве объектов капитального строительства, в том числе в районах Крайнего Севера, является очень перспективным направлением, в первую очередь за счет низкой массы и облегчения логистики [1–3]. Однако в настоящее время эти материалы не нашли широкого распространения, что связано как с недостаточной нормативной базой, которая бы регламентировала условия их эксплуатации, так и с недостаточно полной базой данных о длительных характеристиках ПКМ, деградации их структуры и свойств в условиях длительной эксплуатации в экстремальных геоклиматических условиях [4].

Среди множества внешних факторов, влияющих на свойства ПКМ в условиях эксплуатации, одним из наиболее значительными является солнечное ультрафиолетовое (УФ) излучение [5]. При этом деструкция поверхности образцов при совместном воздействии УФ-излучения и термовлажностных режимов оказывается интенсивнее, чем при их последовательном воздействии [6–11], что подтверждается результатами ряда исследований. Например, в работе [7] при испытаниях углепластика на основе эпоксидной матрицы на старение под воздействием УФ-излучения при температуре 60 °C и в атмосфере насыщенного водяного пара показано, что потеря массы опытного образца при последовательном воздействии двух факторов на протяжении 500 часов

составила 0,8%, а при одновременном – 1,2%. Данный результат объясняется синергетическим эффектом обширной эрозии, приводящей к микрорастрескиванию матрицы и нарушению границ «матрица–волокно» с последующим образованием пустот. При этом максимальная деградация механических свойств при испытании на растяжение была обнаружена у образцов, подвергнутых синергетическому воздействию влаги, температуры и УФ-излучения, и составила 29%.

Аналогичный результат получен в работе [8] при исследовании деструкции под воздействием УФ-излучения шести марок стеклопластиков на основе винилэфирных и эпоксидных матриц в сухом и влажном воздухе. Было показано, что причиной ускоренной деструкции образцов ПКМ во влажной среде являлся процесс удаления продуктов разрушения матрицы под воздействием УФ-излучения во время выдержки опытных образцов во влажной среде, из-за чего их поверхность становилась доступнее для УФ-радиации. При этом авторами работы [12] установлено, что температурное воздействие является важным параметром кинетики разрушения ПКМ под воздействием УФ-излучения. Аналогично авторами работы [13] установлено, что наложение теплового воздействия является ключевым фактором протекания и ускорителем вышеперечисленных химических процессов деструкции полимерной матрицы. Таким образом, разрушение поверхности образцов при совместном воздействии УФ-излучения, тепла и влаги протекает интенсивнее, чем при их последовательном или отдельным воздействии.

Однако многообразие видов ПКМ с различными механическими и эксплуатационными свойствами является существенным блокиратором при разработке методик расчета работоспособности конструкций из них, обеспечивающих прогнозируемую долговечность [9], что, в свою очередь, тормозит процесс внедрения ПКМ во многие отрасли промышленности. При этом известно, что эффективность ПКМ определяется прочностью, жесткостью, пластичностью и другими физико-механическими параметрами, изменение одного из которых может влиять и на остальные механические и эксплуатационные свойства материала [4, 14]. Следовательно, учет процесса деградации ПКМ во время его эксплуатации в различных условиях должен являться частью инженерных расчетов по проектированию элементов различных конструкций капитального строительства для осуществления прогноза долговечности применяемого материала.

Целью настоящей работы является оценка деградации и разработка методики прогнозирования срока службы несущих конструкций из ПКМ, обеспечивающих их надежность и работоспособность с учетом воздействия УФ-излучения, температуры и влаги.

Методы и материалы

Материалом исследования являлись вырезанные на станке ЧПУ стандартные образцы по ГОСТ Р 54924-2017 из сегмента свайной ПКМ-трубы на основе полиэфирной смолы, армированной базальтовым волокном и изготовленной методом мокрой намотки. Перед испытанием опытные образцы кондиционировались по ГОСТ 12423-2013 в стандартной атмосфере 23/50, класс 2. Оценка влияния климатического воздействия на материал проводилась по ГОСТ 9.708-83 (метод 2). Метод включает в себя ускоренные лабораторные испытания при моделировании искусственных климатических факторов. При проведении исследований были реализованы два типа воздействия на опытные образцы ПКМ – это воздействие УФ-излучения и воздействие повышенной температуры (+45 °C) и влажности (90%).

Выемка образцов осуществлялась через 24, 48, 96, 168, 1440, 4100 и 6100 часов. В качестве критерии оценки выступали внешний вид образцов после испытаний и падение механических свойств на растяжение по сравнению с образцами-свидетелями.

Климатические испытания проводились в камере тепла-влаги-холода, в качестве источника УФ-излучения применялись лампы UVA 340.

Испытания на одноосное растяжение проводились по ГОСТ Р 54924-2017 с использованием испытательной машины Zwick/Roell Z100 при температуре 25 °C, относительной влажности 61%



и скорости движения траверсы, равной 2 мм/мин. Перед проведением испытаний на растяжение образцы повторно кондиционировались.

Оценка деградации осуществлялась путем расчета соотношения значений оцениваемых механических свойств по формуле:

$$k_R = R_t / R_0,$$

где R_t – измененные средние значения механических свойств после экспонирования; R_0 – исходное среднее значение соответствующего показателя при испытании на осевое растяжение.

Исследование деградации поверхности проводилось на предварительно отшлифованных образцах, вырезанных из рабочей части в поперечном направлении, с использованием оптического микроскопа Reichert-Jung MeAF-3A, оснащенного анализатором изображений Thixomet Pro.

Результаты

Перед проведением климатических испытаний были оценены механические свойства образцов-свидетелей, не подвергавшихся деградационным воздействиям (табл. 1).

Таблица 1

Результаты испытаний образцов-свидетелей на осевое растяжение

Table 1

Results of axial tension tests of witness samples

№ образца	Предел прочности, МПа	Модуль Юнга, ГПа	Относительное удлинение, %
1	218,6	19,9	1,3
2	220,6	19,4	1,4
3	218,3	18,7	1,6
4	206,5	19,6	1,5
5	230,6	19,5	1,4
Среднее значение	218,9	19,4	1,5
Доверительный интервал	7,5	0,4	0,1

Характерный внешний вид образцов-свидетелей после испытаний на растяжение приведен на рис. 1.

После извлечения образцов из климатической камеры по завершению каждого этапа выемки выполнялся визуально-измерительный контроль фактического состояния образцов. Показано, что вне зависимости от длительности пребывания образцов в климатической камере каких-либо поверхностных дефектов обнаружено не было. На открытых торцах образцов также не наблюдалось видимых невооруженным взглядом дефектов, указывающих на деградацию материала, таких как, например, образование махры наполнителя на торцах образца, расслоения, набухания и т.п. Характерный внешний вид образца по завершению каждого этапа выемки приведен на рис. 2.

Результаты визуально-измерительного контроля образцов после испытаний показали отсутствие видимых невооруженным глазом дефектов. Это позволяет утверждать, что деградация ПКМ от воздействия влаги, тепла и УФ-излучения носит микроструктурный характер.

Обобщенные результаты испытаний на растяжение опытных образцов после различного времени выдержки и сравнение их с образцами-свидетелями приведены на рис. 3.



Рис. 1. Характерный внешний вид образцов после испытаний на растяжение: а) сверху; б) сбоку
Fig. 1. Characteristic appearance of samples after tensile testing: a) top view; b) side view



Рис. 2. Внешний вид образцов после климатических испытаний: а) вид сверху; б) вид сбоку
Fig. 2. Appearance of samples after climatic tests: a) top view; b) side view

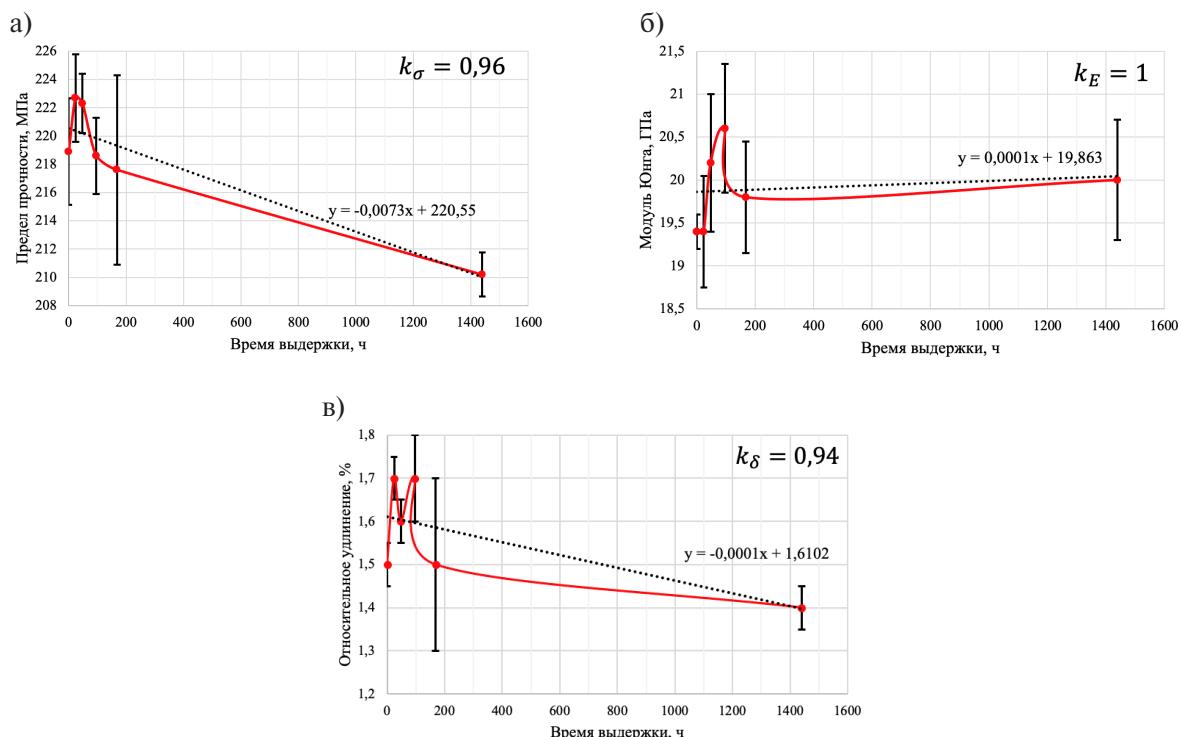


Рис. 3. Зависимость изменения значений: а) предела прочности; б) модуля Юнга; в) относительного удлинения – от времени выдержки в испытательной среде

Fig. 3. Dependence of the change in the values of tensile strength (a); Young's modulus (b); relative elongation (c) on the holding time in the test environment

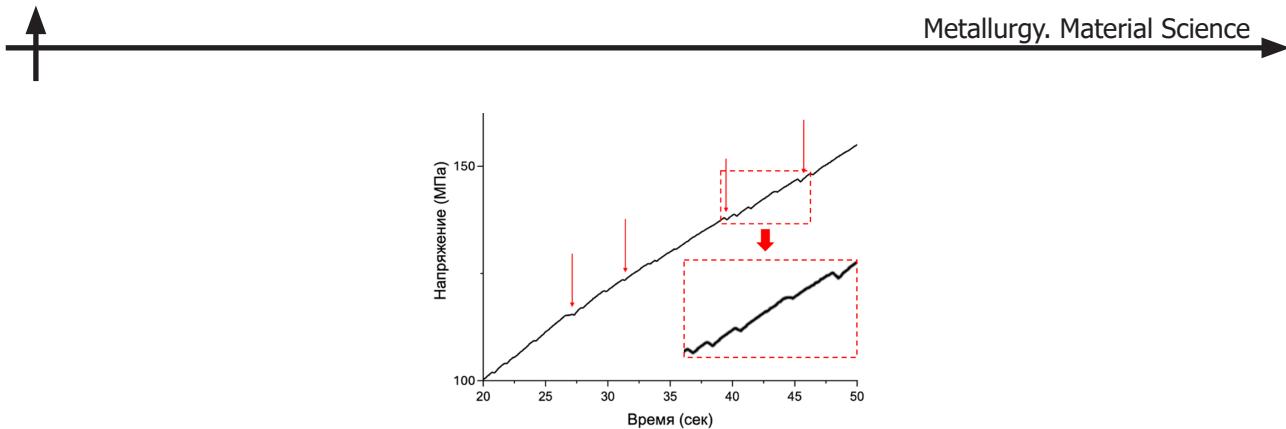


Рис. 4. Участки образования поперечных трещин во внешнем слое образца в процессе его растяжения

Fig. 4. Areas of formation of transverse cracks in the outer layer of the sample during its stretching

Обсуждение

Характер разрушения образцов в исходном состоянии может быть описан как хрупкое разрушение поверхностного слоя с расслоением внутренних слоев. В процессе растяжения отмечалось постепенное растрескивание внешнего слоя, что приводило к кратковременному снижению напряжения материала и выражалось в образовании пиков на графике напряжение/время (рис. 4).

Из обобщенных результатов испытаний на растяжение опытных образцов после различного времени выдержки и сравнения их с образцами-свидетелями видно, что при малом времени выдержки (до 168 часов) деградации механических свойств под действием УФ-излучения, тепла и влаги не происходит. При увеличении времени (до 1440 часов) происходит незначительная деградация предела прочности ($k_o = 0,96$) и относительного удлинения ($k_d = 0,94$), при этом изменение свойств имеет слабовыраженный, приближенный к линейному характер. Наряду с этим упругие свойства опытного материала, с учетом доверительных интервалов, не изменились ($k_E = 1$). Показано, что кратковременное облучение УФ приводит к увеличению механических свойств за счет дополнительного отверждения полимерной матрицы, что согласуется с результатами работ [15, 16].

На основании полученных регрессионных уравнений было установлено, что падение предела прочности на 20% в выбранных условиях экспонирования произойдет через 6103 часа, а относительного удлинения – через 4125 часов. Для подтверждения данных выводов были проведены контрольные экспозиции образцов длительностью 4100 и 6100 часов, полностью подтвердившие результаты регрессионного анализа.

Для установки причин деградации опытных образцов ПКМ было проведено исследование поперечного сечения образцов в исходном состоянии и после выдержек различной протяженности (до 1440 часов) на оптическом микроскопе (рис. 5).

Как следует из представленных фотографий, в образце после экспонирования на протяжении 1440 часов полностью сформированы микротрещины в дефектном-приповерхностном слое, которые являются концентраторами напряжений и укоряют рост и развитие трещин по всему сечению ПКМ при разрушении. Этот вывод согласуется с данными работ [7, 8, 17, 18]. Отмечено, что с увеличением времени экспозиции толщина дефектного слоя после выдержки в течение 1440 часов составляет порядка 100–150 мкм, а 6100 часов – порядка 200–300 мкм.

Заключение

В ходе проведения работы была оценена степень деградации при совместном воздействии УФ-излучения, повышенной температуры и влаги на образцы материала свайной трубы из ПКМ на основе полиэфирной смолы, армированной базальтовым волокном и изготовленной методом мокрой намотки. Установлено, что при малом времени выдержки деградации механических

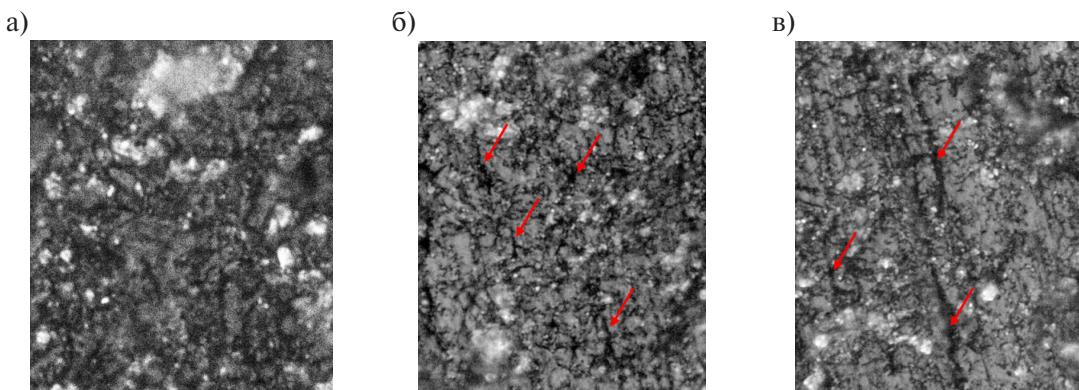


Рис. 5. Структура поверхностного слоя образца-свидетеля (а), после экспонирования на протяжении 1440 часов в период зарождения микротрещин (б); и 6100 часов в период развития и роста микротрещин (в)

Fig. 5. Structure of the surface layer of the witness sample (a), after exposure for 1440 hours during the period of microcrack initiation (b); and 6100 hours during the stage of microcrack development and growth (c)

свойств не происходит. При увеличении времени происходит незначительная деградация предела прочности ($k_g = 0,96$) и относительного удлинения ($k_d = 0,94$), изменение свойств имеет слабовыраженный, приближенный к линейному характер. Были рассчитаны регрессионные уравнения падения механических свойств и определено, что падение предела прочности на 20% в выбранных условиях экспонирования произойдет через 6103 часа, а относительного удлинения – через 4125 часов. Данные результаты были проверены экспериментально, и была доказана линейность падения механических свойств при совместном воздействии УФ-облучения и термовлажностных режимов. При этом реальные условия эксплуатации данного материала в северных районах, даже в летний период, менее интенсивные, что делает его пригодным для дальнейшего применения при строительстве различных конструкций и сооружений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Кустов А.А. Необходимость в разработке новых полимерных композиционных материалов для воздухоопорных и тентовых сооружений, работающих в суровых условиях эксплуатации // Актуальные вопросы современной науки. 2016. С. 240–243.
- [2] Череповицын А.Е., Цветков П.С., Евсеева О.О. Критический анализ методических подходов к оценке устойчивости арктических нефтегазовых проектов // Записки Горного института. 2021. Т. 249. С. 463–478. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.15
- [3] Ермаков Б.С., Швецов О.В., Вологжанина С.А., Нечаев Д.В., Карпов И.Д. Влияние водоотталкивающего покрытия на работоспособность конструкций из полимерных композиционных материалов в условиях экстремально низких температур // Горная промышленность. 2024. № S5. С. 198–203. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-5S-198-203
- [4] Krauklis A.E., Karl C.W., Rocha I.B.C.M., Burlakovs J., Ozola-Davidane R., Gagani A.I., Starkova O. Modelling of environmental ageing of polymers and polymer composites – modular and multiscale methods, Polymers, 14 (1) (2022) 216, DOI: 10.3390/polym14010216
- [5] Ратнер С.Б., Ярцев В.П. Физическая механика пластмасс. Как прогнозируют работоспособность? М.: Химия, 1992. 319 с.
- [6] Лебедев М.П., Старцев О.В., Петров М.Г., Копырин М.М. Образование микротрещин при климатическом старении полимерных композиционных материалов // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2022. № 4. С. 2–11. DOI: 10.31044/1994-6260-2022-0-4-2-11



- [7] Kumar B.G., Singh R.P., Nakamura T. Degradation of carbon fiber-reinforced epoxy composites by ultraviolet radiation and condensation, *Journal of Composite Materials*, 36 (24) (2002) 2713–2733, DOI: 10.1106/002199802028682
- [8] Lu T., Solis-Ramos E., Yi Y.-B., Kumosa M. Synergistic environmental degradation of glass reinforced polymer composites, *Polymer Degradation and Stability*, 131 (2016) 1–8. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2016.06.025
- [9] Гусев Е.Л., Черных В.Д. Перспективные подходы и методы к решению проблемы прогнозирования определяющих характеристик композиционных материалов // Физико-технические проблемы добычи, транспорта и переработки органического сырья в условиях холодного климата. 2024. С. 253–256. DOI: 10.24412/cl-37255-2024-1-253-256
- [10] Belec L., Nguyen T.H., Nguyen D.L., Chailan J.F. Comparative effects of humid tropical weathering and artificial ageing on a model composite properties from nano- to macro-scale, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 68 (2015) 235–241. DOI: 10.1016/j.compositesa.2014.09.028
- [11] Kychkin A.K., Startsev O.V., Lebedev M.P., Polyakov V.V. Effect of solar radiation and synergism of the effect of UV radiation, temperature and moisture on the destruction of polymer composite materials in a cold climate, *Procedia Structural Integrity*, 30 (2020) 71–75. DOI: 10.1016/j.prostr.2020.12.012
- [12] Balasubramanian K.R., Kumar K.R., Prabhakaran S.P.S., Jinshah B.S., Abhishek N. Thermal degradation studies and hybrid neural network modelling of eutectic phase change material composites, *International Journal of Energy Research*, 46 (2022) 15733–15755. DOI: 10.1002/er.8272
- [13] Каблов Е.Н., Старцев В.О. Климатическое старение полимерных композиционных материалов авиационного назначения. I. Оценка влияния значимых факторов воздействия // Деформация и разрушение материалов. 2019. №. 12. С. 7–16. DOI: 10.31044/1814-4632-2019-12-7-16
- [14] Hsisou R., Seghiri R., Benzekri Z., Hilali M., Rafik M., Elharfi A. Polymer composite materials: A comprehensive review, *Composite Structures*, 262 (2021) 113640. DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.113640
- [15] Kim D.S., Seo W.H. Ultraviolet-curing behavior and mechanical properties of a polyester acrylate resin, *Journal of Applied Polymer Science*, 92 (6) (2004) 3921–3928, DOI: 10.1002/app.20422
- [16] Decker C. Kinetic study and new applications of UV radiation curing, *Macromolecular Rapid Communications*, 23 (18) (2002) 1067–1093. DOI: 10.1002/marc.200290014
- [17] Awaja F., Nguyen M.-T., Zhang S., Arhatari B. The investigation of inner structural damage of UV and heat degraded polymer composites using X-ray micro CT, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42 (4) (2011) 408–418. DOI: 10.1016/j.compositesa.2010.12.015
- [18] Awaja F., Zhang S., Tripathi M., Nikiforov A., Pugno N. Cracks, microcracks and fracture in polymer structures: Formation, detection, autonomic repair, *Progress in Materials Science*, 83 (2016) 536–573, DOI: 10.1016/j.pmatsci.2016.07.007

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

НЕЧАЕВ Даниил Валерьевич – инженер-исследователь, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.
 E-mail: nechaev_dv@spbstu.ru
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5997-143X>

ШВЕЦОВ Олег Викторович – инженер-исследователь, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, канд. техн. наук.
 E-mail: shvec_off@mail.ru
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9368-4074>

ЕРМАКОВ Сергей Борисович – директор НИОЦ, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.
E-mail: ermakov_sb@spbstu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4243-0984>

REFERENCES

- [1] **A.A. Kustov**, Need for development of new polymeric composite materials for the air-supported and awning constructions working in severe service conditions, *Aktual'nye voprosy sovremennoi nauki* [Current issues of modern science], (2016) 240–243.
- [2] **A.E. Cherepovitsyn, P.S. Tsvetkov, O.O. Evseeva**, Kriticheskii analiz metodicheskikh podkhodov k otsevke ustoichivosti arkticheskikh neftegazovykh proektorov, *Journal of Mining Institute*, 249 (2021) 463–478, DOI: 10.31897/PMI.2021.3.15
- [3] **B.S. Ermakov, O.V. Shvetsov, S.A. Vologzhanina, D.V. Nechaev, I.D. Karpov**, The influence of water-repellent coating on the performance of structures made of polymer composite materials in conditions of extremely low temperatures, *Russian Mining Industry*, 5S (2024) 198–203, DOI: 10.30686/1609-9192-2024-5S-198-203
- [4] **A.E. Krauklis, C.W. Karl, I.B.C.M. Rocha, J. Burlakovs, R. Ozola-Davidane, A.I. Gagani, O. Starkova**, Modelling of environmental ageing of polymers and polymer composites – modular and multiscale methods, *Polymers*, 14 (1) (2022) 216, DOI: 10.3390/polym14010216
- [5] **S.B. Ratner, V.P. Iartsev**, *Fizicheskaya mekhanika plastmass. Kak prognoziruiut rabotosposobnost'* [Physical mechanics of plastics. How is performance predicted?] Moscow: Khimiia, 1992. 319 p.
- [6] **M.P. Lebedev, O.V. Startsev, M.G. Petrov, M.M. Kopyrin**, Formation of microcracks during climatic aging of polymer composite materials, *All materials. Encyclopaedic reference manual*, 4 (2022) 2–11, DOI: 10.31044/1994-6260-2022-0-4-2-11
- [7] **B.G. Kumar, R.P. Singh, T. Nakamura**, Degradation of carbon fiber-reinforced epoxy composites by ultraviolet radiation and condensation, *Journal of Composite Materials*, 36 (24) (2002) 2713–2733, DOI: 10.1106/002199802028682
- [8] **T. Lu, E. Solis-Ramos, Y.-B. Yi, M. Kumosa**, Synergistic environmental degradation of glass reinforced polymer composites, *Polymer Degradation and Stability*, 131 (2016) 1–8. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2016.06.025
- [9] **E.L. Gusev, V.D. Chernykh**, Perspektivnye podkhody i metody k resheniiu problemy prognozirovaniia opredeliaishchikh kharakteristik kompozitsionnykh materialov [Promising approaches and methods for solving the problem of predicting the defining characteristics of composite materials], *Fiziko-tehnicheskie problemy dobychi, transporta i pererabotki organicheskogo syr'ia v usloviakh kholodnogo klimata* [Physical and technical problems of extraction, transportation and processing of organic raw materials in cold climate conditions], (2024) 253–256, DOI: 10.24412/cl-37255-2024-1-253-256
- [10] **L. Belec, T.H. Nguyen, D.L. Nguyen, J.F. Chailan**, Comparative effects of humid tropical weathering and artificial ageing on a model composite properties from nano- to macro-scale, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 68 (2015) 235–241. DOI: 10.1016/j.compositesa.2014.09.028
- [11] **A.K. Kychkin, O.V. Startsev, M.P. Lebedev, V.V. Polyakov**, Effect of solar radiation and synergism of the effect of UV radiation, temperature and moisture on the destruction of polymer composite materials in a cold climate, *Procedia Structural Integrity*, 30 (2020) 71–75. DOI: 10.1016/j.prostr.2020.12.012
- [12] **K.R. Balasubramanian, K.R. Kumar, S.P.S. Prabhakaran, B.S. Jinshah, N. Abhishek**, Thermal degradation studies and hybrid neural network modelling of eutectic phase change material composites, *International Journal of Energy Research*, 46 (2022) 15733–15755. DOI: 10.1002/er.8272



- [13] **E.N. Kablov, V.O. Startsev**, Climatic aging of aviation polymer composite materials: I. Influence of significant factors, *Russian Metallurgy (Metally)*, 2020 (4) (2020) 364–372, DOI: 10.1134/S0036029520040102
- [14] **R. Hsissou, R. Seghiri, Z. Benzekri, M. Hilali, M. Rafik, A. Elharfi**, Polymer composite materials: A comprehensive review, *Composite Structures*, 262 (2021) 113640. DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.113640
- [15] **D.S. Kim, W.H. Seo**, Ultraviolet-curing behavior and mechanical properties of a polyester acrylate resin, *Journal of Applied Polymer Science*, 92 (6) (2004) 3921–3928, DOI: 10.1002/app.20422
- [16] **C. Decker**, Kinetic study and new applications of UV radiation curing, *Macromolecular Rapid Communications*, 23 (18) (2002) 1067–1093. DOI: 10.1002/marc.200290014
- [17] **F. Awaja, M.-T. Nguyen, S. Zhang, B. Arhatari**, The investigation of inner structural damage of UV and heat degraded polymer composites using X-ray micro CT, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42 (4) (2011) 408–418. DOI: 10.1016/j.compositesa.2010.12.015
- [18] **F. Awaja, S. Zhang, M. Tripathi, A. Nikiforov, N. Pugno**, Cracks, microcracks and fracture in polymer structures: Formation, detection, autonomic repair, *Progress in Materials Science*, 83 (2016) 536–573, DOI: 10.1016/j.pmatsci.2016.07.007

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Daniil V. NECHAEV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
E-mail: nechaev_dv@spbstu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5997-143X>

Oleg V. SHVETSOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
E-mail: shvec_off@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9368-4074>

Sergey B. ERMAKOV – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.
E-mail: ermakov_sb@spbstu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4243-0984>

Поступила: 16.02.2025; Одобрена: 05.03.2025; Принята: 19.03.2025.
Submitted: 16.02.2025; Approved: 05.03.2025; Accepted: 19.03.2025.