

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 678

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-1-148-161>



Оригинальная статья

Исследование сохранения физико-механических свойств стекло-углепластиков при провокационном биозаражении в условиях холодного климата

А. К. Кычкин¹, А. А. Кычкин^{✉,2}, Н. Ф. Стручков¹

¹Институт физико-технических проблем Севера
им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

²Якутский научный центр СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

✉ icen.kychkin@mail.ru

Аннотация

Общепринятой практикой для определения сроков безопасной эксплуатации полимерных композитов является их климатическая стойкость. Она основана на экспериментальных исследованиях влияния агрессивных климатических факторов на физико-механические свойства материалов, используемых в различных климатических зонах. В данной статье представлены результаты исследований климатических испытаний (старения) в условиях экстремально холодного климата образцов стекло-углепластиков. Для оценки влияния климатических и биогенных факторов на полимерные композиты использовались методы микроструктурного анализа, динамического механического анализа (ДМА) и исследования упругопрочностных характеристик. Образцы подвергались двухлетнему климатическому экспонированию с провокационным внесением микроорганизмов для изучения изменений их свойств и структурных особенностей. Установлено, что образование микробных колоний, выделение ими продуктов метаболизма разрушают полимерную матрицу, что приводит к снижению предела прочности при растяжении у стеклопластика (СП) на 57 %, у углепластика (УП) на 8 %. Полученные результаты подтверждены исследованиями методами ДМА, профилометрии и измерения открытой пористости. Данные, полученные при изучении поверхностной деструкции, пористости и ДМА, свидетельствуют о старении материала, начинающемся с поверхностного слоя. Это проявляется в увеличении пористости, изменении степени полимеризации полимерной матрицы слоистых пластиков, а также в значительном снижении упруго-прочностных характеристик при провокационном внесении микроорганизмов. Выявленные изменения подтверждаются снижением динамического модуля упругости и повышением температуры стеклования. Полученные результаты о влиянии биогенных микроорганизмов на процессы старения полимерных композитов при одновременном воздействии УФ-излучения и низких температур могут быть применены для решения вопросов по снижению старения полимеров.

Ключевые слова: композитные материалы, биодеструкция, повреждения, прочность, модуль упругости, динамический механический анализ, профилометрия, температура стеклования

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRS-2024-0058) с использованием научного оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Для цитирования: Кычкин А.К., Кычкин А.А., Стручков Н.Ф. Исследование сохранения физико-механических свойств стекло-углепластиков при провокационном биозаражении в условиях холодного климата. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(1):148–161. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-1-148-161>

The preservation of physical and mechanical properties of glass-carbon composites under provocative biocontamination in cold climate conditions

Anatoliy K. Kychkin¹, Aisen A. Kychkin^{✉,2}, Nikolay F. Struchkov¹

¹Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North,

Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

²Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

✉ icen.kychkin@mail.ru

Abstract

A common practice for determining the safe service life of polymer composites is to assess their climatic resistance. This evaluation is based on experimental studies that examine the effects of aggressive climatic factors on the physical and mechanical properties of materials used in various climatic zones. This article presents the results of climatic aging tests conducted on glass-carbon plastic samples under extremely cold conditions. Microstructural analysis, dynamic mechanical analysis (DMA), and assessments of elastic-strength characteristics were used to evaluate the climatic and nutrient impacts on these polymer composites. The samples underwent two years of climatic exposure, during which provocative phenomena were introduced to investigate changes in their properties and structural features. As a result of the studies, a decrease in the tensile strength of a fiberglass (FG) by 57% and of the carbon fiber-reinforced plastics (CFRP) by 8% was observed. The obtained results are supported by studies of DMA, profilometry and open porosity. The findings regarding surface degradation, porosity, and DMA confirm the aging of the material in the surface layer, an increase in porosity, and changes in the degree of polymerization of the polymer matrix in layered plastics. Furthermore, the introduction of microorganisms significantly reduces the elastic-strength characteristics of the materials. The identified changes are confirmed by a decrease in the dynamic modulus of elasticity and an increase in the glass transition temperature. The results obtained regarding the influence of biogenic microorganisms on the aging processes of polymer composites, under simultaneous exposure to UV radiation and low temperatures, can be applied to address issues related to reducing the polymer aging.

Keywords: composite materials, biodegradation, damages, strength, modulus of elasticity, dynamic mechanical analysis, profilometry, glass transition temperature

Funding. This study was conducted within the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (No. FWRS-2024-0058) using scientific equipment of 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: Kychkin A.K., Kychkin A.A., Struchkov N.F. The preservation of physical and mechanical properties of glass-carbon composites under provocative biocontamination in cold climate conditions. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(1):148–161. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-4-148-161>

Введение

Полимерные композиционные материалы (ПКМ), работающие в составе изделий в открытых климатических условиях, испытывают, кроме эксплуатационных нагрузок, одновременное воздействие ультрафиолетового излучения, температуры воздуха, влажности окружающей среды, количества осадков и влияние биоразнообразия организмов на деструкцию материала. Несмотря на большое количество исследований, посвященных оценке состояния ПКМ в открытых климатических условиях, актуальность проблемы адекватного определения и прогнозирования долговечности ПКМ неуклонно возрастает, и до настоящего времени не выработано единого научного подхода о линейности или нелинейности

суммирования повреждений в композитах при раздельном и совместном воздействии группы агрессивных климатических и биогенных факторов. Не определены критерии отбора линейной или нелинейной суперпозиции повреждений на микро- и макроуровнях при прогнозировании старения ПКМ с учетом влияния биодеструкции окружающей среды. С помощью лабораторных исследований не удается воспроизвести условия открытой эксплуатационной среды. Поэтому невозможно достоверно прогнозировать долговечность изделий из ПКМ на длительные периоды эксплуатации, что тормозит их применение.

Единственным надежным методом определения срока службы материала является прямой натурный эксперимент, который позволяет под-

твердить и обосновать сохранение свойств в процессе длительной эксплуатации в различных климатических условиях. При этом необходимо получить новые сведения о вкладе различных факторов, кроме основных климатических, в на деструкцию материалов, оценить влияние разнообразных групп микроорганизмов открытой среды, которые активируют процессы деградации компонентов полимерных композитов [1–5].

Поэтому важнейшей задачей в области современного материаловедения является задача развития методов и устройств длительных климатических испытаний, разработка моделей оценки сохранения заданных свойств ПКМ на основе полученных результатов исследования открытой климатической деструкции и биокоррозии на физико-механические характеристики. При этом биоразрушение различных полимерных материалов может являться одной из актуальных экологотехнологических проблем [6.]. Решение определенной проблемы может быть достигнуто только комплексными исследованиями и выявлением закономерностей взаимодействия материалов с биораздражителями и факторами окружающей среды [7].

Изучение взаимосвязи структурно-фазового состояния и свойств полимерных материалов с учетом процессов деградации в экстремальных условиях холодного климата является актуальной задачей, имеющей очевидные практические применения для разработки и создания ПКМ с заданными свойствами.

Материалы и методы исследований

В качестве объектов исследования использовали композитные пластины с размерами 950×450 мм, изготовленные методом вакуумной инфузии и описанные в работах [8–10]. Образцы были выставлены на полигоне г. Якутск ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН согласно ГОСТ 9.708–83.

Исследование поверхностной деструкции и микроструктуры образцов проводилось на растровом электронном микроскопе JSM-7800F (JEOL, Япония) при напряжении от 1,4 до 2 кВ в вакуумной среде.

Открытая пористость определялась апробированным методом гидростатического взвешивания [11] и согласно ПНСТ 532-2021. В качестве рабочей пропитывающей жидкости использован керосин. Для данных исследований были вырезаны образцы размерами 40×40×5 мм, где торце-

вые стороны были закрыты эпоксидной смолой для исключения проникновения пропитывающей жидкости вдоль волокон ткани композитов. Образцы подвергались предварительной сушке при температуре 60 °С в течение 72 ч. Взвешивание осуществлялось на электронных аналитических весах с точностью 0,0001 г. Открытая пористость определялась по следующей формуле:

$$P_o = \frac{m_2 - m}{m_2 - m_1} \cdot 100 \%,$$

где m_2 – масса насыщенного жидкостью для испытаний образца на воздухе, г; m – масса сухого образца, г; m_1 – масса насыщенного жидкостью для испытаний образца в емкости, г.

Параметры шероховатости определены профилометром SurfTest SJ-201P (Mitutoyo, Япония) на 60 случайно выбранных участках каждого образца.

Температура стеклования определялась методом динамического механического анализа на приборе DMA 242 С фирмы NETZSCH. Для испытания образцов применялся держатель для трехточечного изгиба с длиной пролета между опорами 40 мм. Испытания проводились по ГОСТ Р 56753-2015 (метод В) в диапазоне температур от 25 до 150 °С со скоростью нагрева 5 °С/мин. Измерения проводились с частотой вынужденных колебаний 1 Гц при амплитуде колебаний 10 мкм, в среде аргона (расход газа 50 мл/мин.).

Для проведения испытаний на устойчивость к биозаражению ПКМ были отобраны 25 образцов минипластин ПКМ, проведено 68 смывов с опытных образцов гибридных ПКМ, экспонируемых на полигоне, по 5 проб почвы, атмосферного воздуха и снежного покрова с территории полигона [11]. Для провокационного внесения микроорганизмов были использованы выделенные штаммы плесневых грибов: *Aspergillus niger* ПКМ-7 и спорообразующих бактерий *Bacillus atropheus* ELA-2. Подбор консорциума выполнен по принципу нейтрального действия микробных культур друг на друга. Перед постановкой опыта образцы ПКМ стерилизовали обработкой 70%-м этиловым спиртом, затем заражали микроорганизмами в соответствии с ГОСТ Р 57859-2017. Заданная концентрация микробной суспензии для биозаражения соответствовала 1–10 млн КОЕ/см³ [12].

Для выявления биологического воздействия на упругопрочностные свойств биозараженных слоистых пластиков экспонированные образцы

(акт съема № 01/10-23 от 26.10.2023г) были подвержены серии испытаний на растяжение ГОСТ Р 56785-2015, изгиб ГОСТ Р 56810-2015 с применением универсальной разрывной машины «Zwick Roel Z600» (Zwick, Ulm, Германия), тип ВРС-F0600TN.R09, серийный номер 160088-2008 на базе ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН. Чтобы исключить пластифицирующий эффект воздействия влаги, композиты перед механическими испытаниями подвергались сушке при температуре 60 °С в течение 72 ч. Для проведения испытаний на растяжение были подготовлены образцы по 5 штук с каждого типа пластиков, с размерами 10×250±2 мм с приклеиванием накладок размерами 10×75±2 мм с уклоном 30° для исключения влияния захватов на деформацию испытуемого материала. Длина

рабочего участка составляла не меньше 95±2 мм, скорость испытания ($V_{исп}$) составляла 2 мм/мин. Экстензометр устанавливался с базой замера на напряжения 50 мм рабочего участка образца.

Результаты исследований

Для моделирования и прогнозирования физико-механических показателей полимерных композиционных материалов при климатической деструкции необходимо фиксировать реальные показатели среды, воздействующей за период экспонирования материалов.

Данные приземных метеорологических наблюдений (рис. 1) получены от Федерального государственного бюджетного учреждения «Якутское управление по гидрометеорологии и монито-

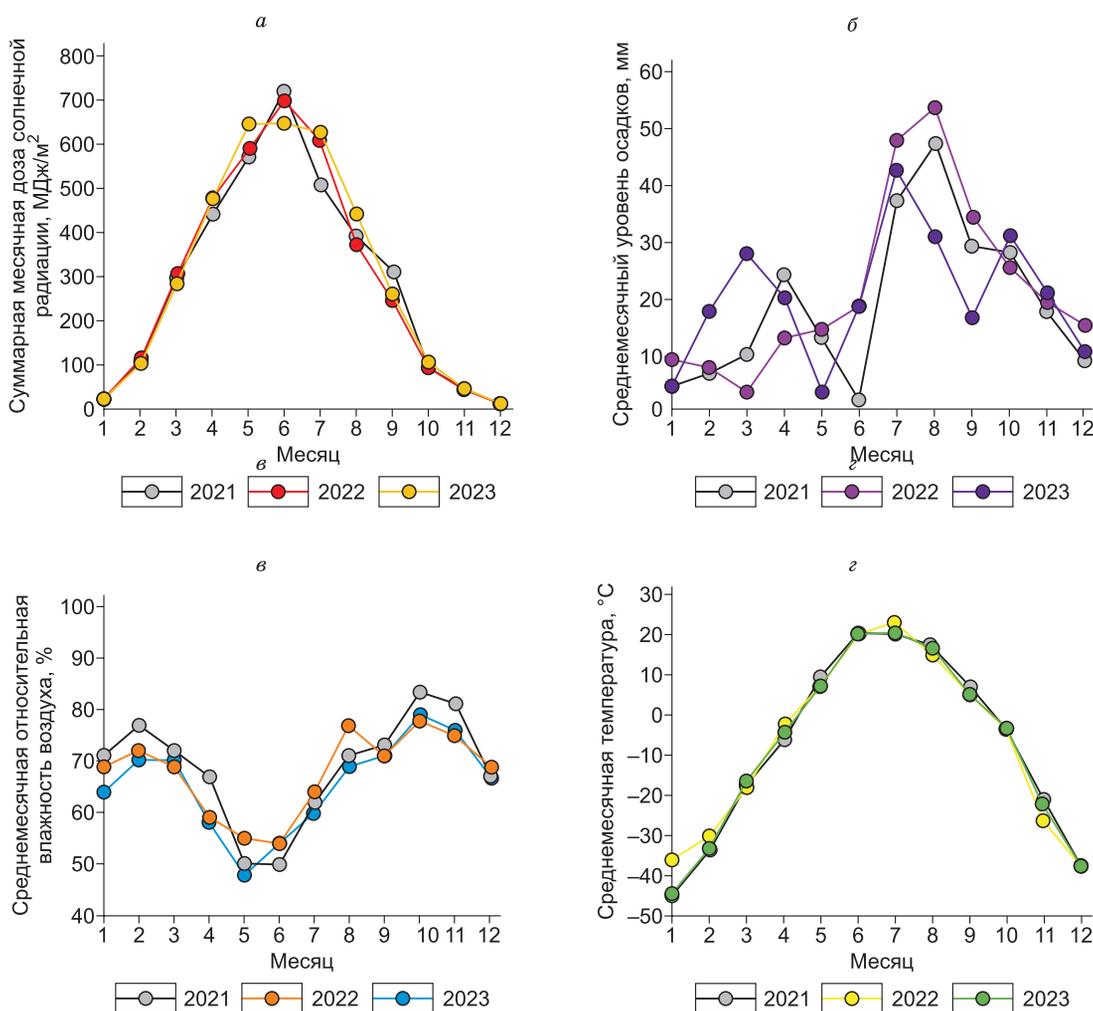


Рис. 1. Среднемесячные климатические показатели г. Якутск за 2021–2023 гг.: а – доза суммарной солнечной радиации, б – количество осадков, в – относительная влажность, з – температура

Fig. 1. Average monthly climatic indicators for the city of Yakutsk: а) total solar radiation dose, б) precipitation amount, в) relative humidity, and з) temperature, for the years 2021 to 2023

рингу окружающей среды» согласно договору № 20/1 от 14.12.2020 г.

Приземные метеорологические наблюдения производились на сети метеопостов. На рис.1 (а–г) представлены среднемесячные показатели температуры, относительной влажности, доза суммарной солнечной радиации, количество осадков за период климатических испытаний (2021–2023 гг.).

Из анализа полученных данных (см. рис.1) следует, что максимум относительной влажности воздуха наблюдался в летнее время – 82 %, минимум – зимой – 11–14 %. Наибольшее количество осадков зарегистрировано в августе – 53,5 мм. Минимальное количество осадков зарегистрировано в марте и мае – 3,3 мм. Переход от отрицательных температур к положительным наблюдался с сентября по ноябрь и в апреле–мае. Минимальная температура в зимний период составила $-51,9^{\circ}\text{C}$ в январе, а максимальная $+32,6^{\circ}\text{C}$ в июне. Годовая амплитуда температур составила $84,5^{\circ}\text{C}$.

В рамках выполнения проекта проводились ежеквартальное освидетельствование и визуальный осмотр поверхности образцов в процессе экспозиции на открытом полигоне.

При проведении визуального осмотра 09.04.2022 (рис. 2) в образцах наблюдались: потеря глянца, слабое изменение цвета полимерной матрицы, незначительное оголение поверхности, увеличение поверхностных пор, локальное загрязнение поверхности.

Известно, что одним из важных факторов, влияющим на свойства полимерных композиционных материалов, является солнечная радиация [13–16], в частности ее ультрафиолетовая составляющая. Воздействие солнечной радиации приводит к фотодеструкции поверхности материала, образованию напряжений, трещин и разрушению поверхности матрицы, вследствие чего происходит оголение поверхностных слоев армирующего наполнителя, что снижает несущую нагрузку материалов. При деструкции и эрозии поверхности за счет воздействия УФ-излучения толщина образца может снижаться, количество дефектов и количество сорбированной влаги растет, что приводит к снижению прочности материала.

На рис. 3, 4 представлены микрофотографии (растровая электронная микроскопия (РЭМ)) поверхностей исследуемых образцов стеклопластиков (СП). Образцы, расположенные на лицевой стороне, были направлены в сторону солнца.

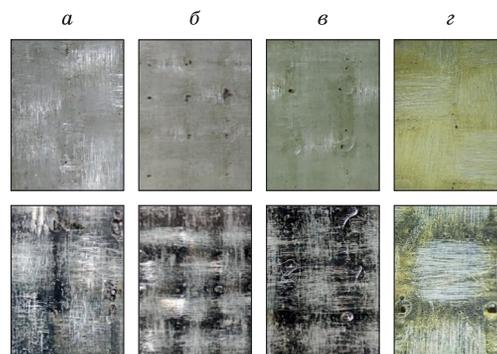


Рис. 2. Внешний вид образцов до экспозиции (а), апрель 2022 года (б), после 12 месяцев экспозиции (в), после 24 месяцев экспозиции (г)

Fig. 2. Appearance of samples before exposure (a), in April 2022 (b), after 12 months of exposure (в), and after 24 months of exposure (г)

У исходного образца стеклопластика наблюдается плотный контакт армирующего материала с полимерным связующим (см. рис. 3). После климатических испытаний на поверхностях образцов наблюдается оголение армирующего материала, увеличение поверхностных пор, локальное загрязнение поверхности. При анализе общей структуры срезов образцов СП после климатических испытаний видно, что биозараженный образец характеризуется более выраженным отслоением армирующих волокон от полимерной матрицы, а также увеличением количества микротрещин в полимерном связующем. Кроме того, у биозараженного образца отмечается формирование на волокнах нехарактерных компонентов, что связано с образованием микроколоний микроорганизмов (см. рис. 3).

Микроструктура поверхностей солнечной стороны и продольных срезов образцов углепластиков (УП) представлены на рис. 4.

Анализ структуры контрольного образца УП показывает, что углеволокна находятся в плотном контакте с полимерным связующим (см. рис. 4). Образец УП, прошедший климатические испытания, также сохраняет плотный контакт с полимерным связующим (см. рис. 4). На поверхности образцов УП отмечаются микротрещины в поверхностном слое полимерного связующего. При исследовании продольных срезов биозараженных образцов УП после двухлетней экспозиции под увеличением обнаружена локализация колоний грибов (см. рис. 4).

Результаты фактографических исследований микроструктуры поверхностей образцов и про-

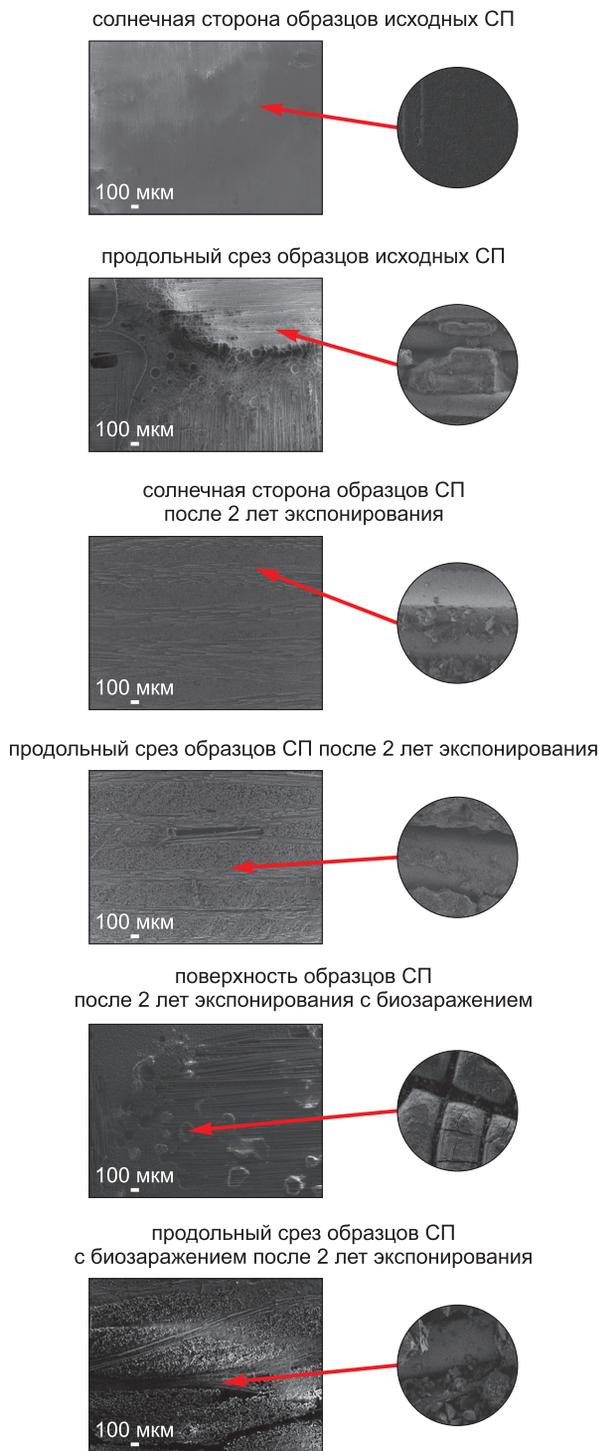


Рис. 3. Микроструктура поверхности лицевой стороны и продольных срезов стеклопластиков

Fig. 3. Microstructure of the surface of the front side and longitudinal sections of fiberglass

дольных срезов показывают, что после 2 лет климатических испытаний у образцов СП наиболее сильно проявляются микрорастрескования

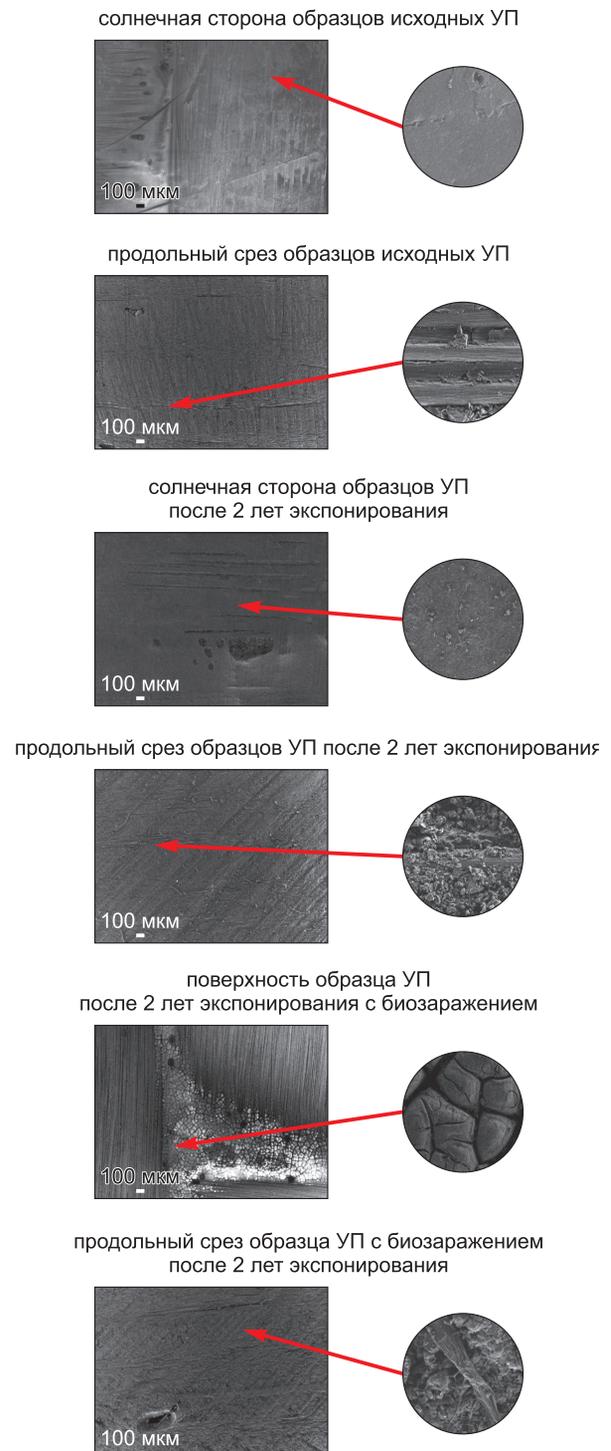


Рис. 4. Микроструктура поверхности лицевой стороны и продольных срезов углепластиков

Fig. 4. Microstructure of the surface of the front side and longitudinal sections of carbon fiber-reinforced plastics

на поверхности и расслоения внутри материала между полимерной матрицей и армирующим материалом, чем у образцов УП. Эрозия поверх-

ностей материалов связана с осушением первичного слоя матрицы. Значительное расслоение у образцов СП, видимо, связано с ростом внутренних напряжений между полимерной матрицей и армирующим материалом.

Результаты исследования открытой пористости и средней шероховатости представлены в табл. 1.

У образцов СП-Б с провокационным биозаражением открытая пористость после 1 года экспонирования повышается в 5,6 раза и далее растет до 0,96 % после 2 года. У биозараженного УП после 1 года и 2 лет экспонирования открытая пористость значительно меньше (в 2,8 и в 2,3 раза соответственно), чем у незараженного УП.

Изменения показателей шероховатости композитов после 1 года экспозиции носят разнонаправленный характер: наблюдается как увеличение, так и уменьшение значений. Однако после 2 года экспонирования шероховатость возрастает у всех марок исследуемых композитов. Данное изменение может быть связано с усадкой, набуханием, частичным разрушением поверхностного слоя или, наоборот, его уплотнением под воздействием влаги, температуры и УФ-излучения [17]. Это может приводить как к увеличению, так и к уменьшению шероховатости в зависимости от структуры материала. Ко 2 году у материалов накапливаются повреждения, в том числе вызванные биологическим воздействием: микроорганизмы колонизировали поверхность материала, с выделением продуктов метаболизма, разрушающих полимерную матрицу, способствуя увеличению шероховатости.

С увеличением времени экспонирования профили поверхностей претерпевают существенные

Таблица 1
Значения открытой пористости и средней шероховатости слоистых пластиков

Table 1
Values of open porosity and average roughness in laminates

Марка	Открытая пористость По, % / Средняя шероховатость, мкм		
	исходные	после 1 года экспонирования	после 2 лет экспонирования
СП	0,17 / 1,61	0,44 / 1,5	0,27 / 5,92
УП	0,13 / 1,17	0,42 / 1,07	0,45 / 2,3
СП-Б	0,17 / 1,61	0,68 / 3,15	0,96 / 6,5
УП-Б	0,13 / 1,17	0,15 / 1,07	0,19 / 1,67

изменения и приобретают более шероховатые текстуры. Данные изменения происходят за счет выветривания поверхностного слоя, обнажения изолированных пор и оголения наиболее близких к поверхности участков волокон ткани композитов [18].

На рис. 5 показаны профилограммы поверхности лицевой стороны биозараженного СП до, после 1 года и 2 лет испытаний.

Биозараженный СП, несмотря на сопоставимые значения средней шероховатости (см. табл. 1), имеет более широкий размах профилей, чем слоистые пластики УП и УП-Б, у которых данные по средней шероховатости и профилям коррелируются и имеют минимальный разброс, что показывает высокую устойчивость к биозаражению.

Исследование ДМА материалов позволило подтвердить и уточнить выводы о влиянии биодеструкторов с провокационным нанесением на их климатическую стойкость.

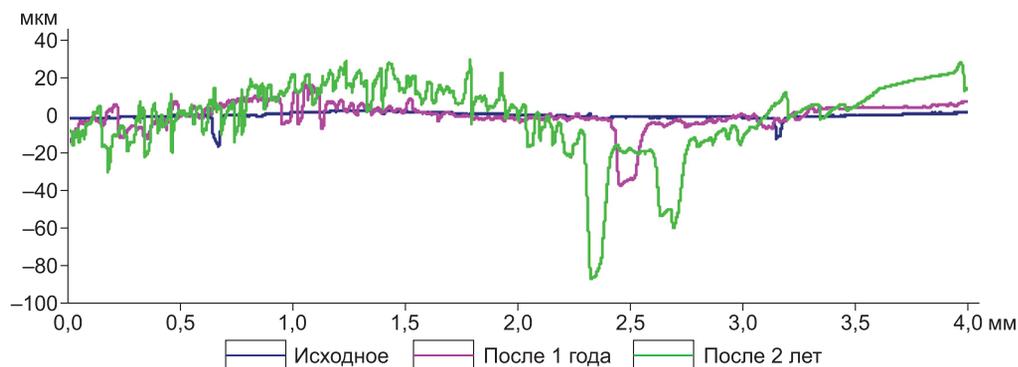


Рис. 5. Профилограммы поверхности лицевой стороны СП-Б до, после 1 года и 2 лет испытаний

Fig. 5. Profilograms of the surface of the front side of FG-B before testing, after 1 year of testing, and after 2 years of testing

После экспонирования образцов с провокационным внесением биодеструкторов отчетливо выявляется снижение динамического модуля упругости и повышение температуры стеклования (рис. 6, 7).

В табл. 2 представлены результаты исследований влияния провокационного внесения биодеструкторов на ДМА-характеристики образцов УП и СП.

Результаты ДМА-анализа образцов с провокационным внесением микроорганизмов показали снижение динамического модуля упругости и повышение температуры стеклования у образцов СП и УП на 10 и 9 °С соответственно. Динамический модуль упругости лицевых сторон биозараженных образцов оказался ниже на 26 и 46 % по сравнению с исходными образцами и образцами после двух лет экспозиции соответственно. Для тыльных сторон снижение составило 11 и 13 %. При этом у биозараженных образцов на солнечной стороне накапливается больше напряжений, чем на теневой, что подтверждается снижением модуля потерь на 60 %. Повышение температуры стеклования можно объяснить тем, что микроорганизмы в объеме полимерной матрицы ограничивают сегментальную подвижность, смещая переход материала в эластичное состояние.

На рис. 8, 9 представлены результаты испытаний на растяжение и на изгиб. Полученные результаты испытаний свидетельствуют, что после 24 месяцев натуральных испытаний с биологическим воздействием на материалы наблюдается снижение показателей E_p и σ_p , в зависимости от количества углеткани в композите: у СП – σ_p на 57, E_p – на 35 % от исходных значений, у УП – снижение σ_p на 8 %, повышение E_p на 5 %.

Для проведения испытаний на изгиб были изготовлены плоские образцы с размерами $20 \times 110 \pm 1$ мм по 5 штук для каждого вида материала. Образец, лежащий на двух опорах с расстоянием 80 мм, нагружали $V_{исп}$ 2 мм/мин до момента разрушения. Радиус закругления нагружающего пуансона составлял 5 мм.

Полученные результаты испытаний свидетельствуют, что после 24 месяцев натуральных испытаний с биологическим воздействием на материалы наблюдается снижение показателей E_u и σ_u : у СП – σ_u на 57 %, E_u – на 49 %, у УП – σ_u на 21, E_u – на 4 % относительно исходных значений.

Для оценки влияния биогенных факторов воздействия в течение 24 месяцев на упругопрочностные свойства пластиков был введен обобщенный показатель – относительный коэффициент сохраняемости согласно формуле

$$k_R = R_t / R_0,$$

где R_t принимает пределы прочности при растяжении, изгибе, полученные после экспонирования 12 (R_{12}) и 24 (R_{24}) месяца на открытом полигоне; R_0 принимает соответствующие пределы исходных результатов материала.

В табл. 3 представлены упругопрочностные свойства по типам композитов. Углепластик менее подвержен биодеструкции и обладает более высокой климатической устойчивостью по сравнению со стеклопластиком. Прочностные характеристики СП после климатических испытаний с провокационным внесением микроорганизмов снизились на 35–57 %.

Заключение

Проведенный анализ демонстрирует значительное влияние микроорганизмов на свойства полимерных композиционных материалов. Образование микробных колоний на поверхности и в объеме материала приводит к выделению продуктов метаболизма, которые разрушают полимерную матрицу, способствуют появлению микротрещин, расслоений и увеличению шероховатости. Это подтверждается снижением динамического модуля упругости, повышением температуры стеклования и значительным уменьшением прочностных характеристик, особенно у материалов типа СП.

Микроорганизмы также влияют на распределение внутренних напряжений, что особенно заметно на солнечной стороне образцов, где накопление напряжений происходит интенсивнее. Эти процессы указывают на необходимость учета биогенных факторов при разработке новых материалов и моделей деструкции. Устойчивость к биокоррозии и климатическим воздействиям должна стать важным критерием при проектировании полимерных композитов, особенно предназначенных для эксплуатации в условиях повышенной влажности и температуры.

Таким образом, для создания долговечных и надежных материалов необходимо учитывать влияние микроорганизмов на структурно-фазо-

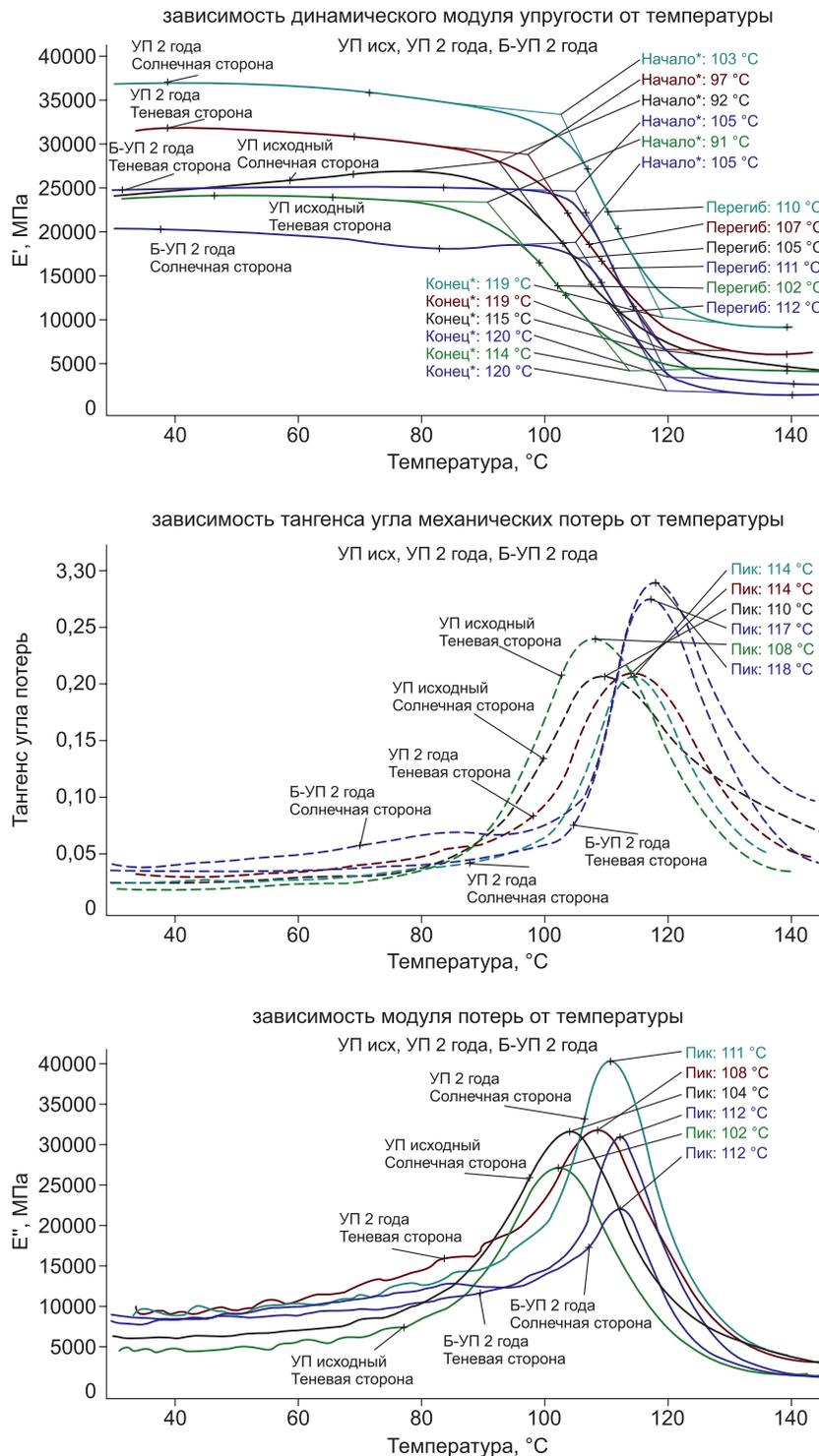


Рис. 6. Зависимости модуля упругости, тангенса угла механических потерь и модуля потерь УП исходного, УП 2 года климатического воздействия и Б-УП 2 года климатического воздействия (теневой и солнечной стороны) от температуры

Fig. 6. Dependence of the elastic modulus, mechanical loss tangent, and loss modulus of CFRP initial, CFRP 2 years climate impact, and Б-CFRP 2 years climate impact (both shaded and sunny sides) on temperature

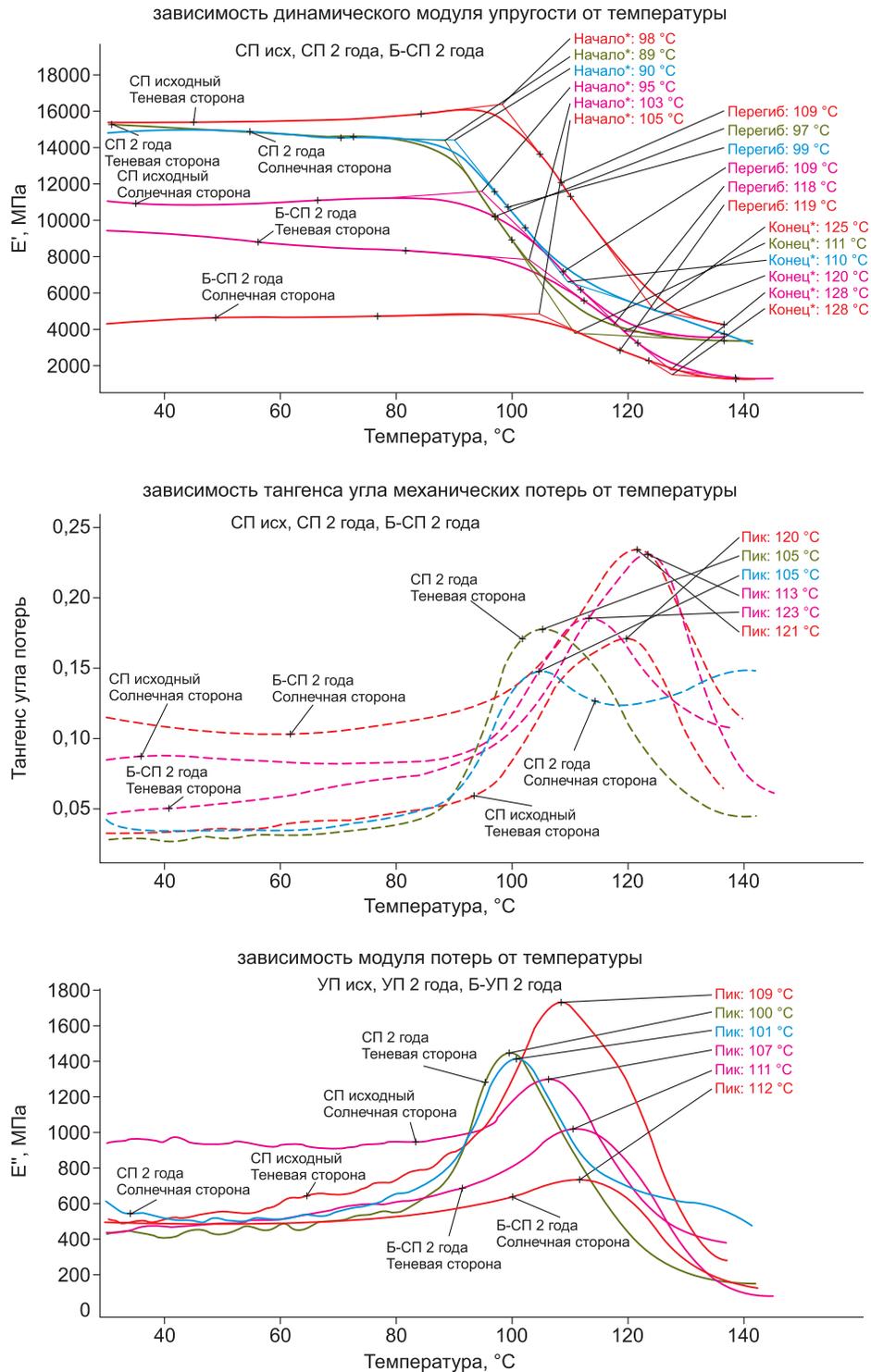


Рис. 7. Зависимости модуля упругости, тангенса угла механических потерь и модуля потерь СП исходный, СП 2 года климатического воздействия и Б-СП 2 года климатического воздействия (теневой и солнечной стороны) от температуры

Fig. 7. Dependence of the elastic modulus, mechanical loss tangent, and loss modulus of FG initial, FG 2 years climate impact, and B-FG 2 years climate impact (both shaded and sunny sides) on temperature

Таблица 2

Результаты ДМА образцов УП и СП

Table 2

DMA results of CFRP and FG samples

Наименование показателя	Образцы	УП		СП	
		С ¹	Т ²	С	Т
Значение модуля упругости E' , МПа	Исх	24469	24128	11034	15366
	2 года	36995	36995	14873	15229
	2 года с Б ³	20314	24710	4280	9381
Экстраполированное значение начала перехода на кривой модуля упругости – T_{onset} , °С	Исх	92	91	95	98
	2 года	103	97	90	89
	2 года с Б	105	105	105	103
Точка перегиба – T_g , °С	Исх	105	102	109	109
	2 года	110	107	99	97
	2 года с Б	112	111	119	118
Экстраполированное окончание перехода на кривой модуля упругости, °С	Исх	115	114	120	125
	2 года	119	119	110	111
	2 года с Б	120	120	129	128
Пик на кривой тангенса T_{tg} , °С	Исх	110	108	113	120
	2 года	114	114	105	105
	2 года с Б	118	117	121	123
Пик на кривой модуля потерь – T_{loss} , °С	Исх	104	102	107	109
	2 года	111	108	101	100
	2 года с Б	112	112	112	111

¹ Солнечная сторона образцов / sunny side.

² Теневая сторона образцов / shaded side.

³ Образцы с провокационным биозаражением / Samples with provocative biocontamination.

Таблица 3

Изменение коэффициента сохраняемости упругопрочностных свойств биозараженных слоистых пластиков

Table 3

Change in the coefficient of retention of elastic strength properties of biocontaminated laminated plastics

Маркировка	Показатель	R_0	R_{12}	R_{24}	k_{R12}	k_{R24}
Б-СП	σ_p , МПа	610,66	612,45	260,43	1,00	0,43
	E_p , ГПа	27,60	24,24	17,96	0,88	0,65
	σ_u , МПа	625,93	356,47	275,30	0,57	0,44
	E_u , ГПа	23,92	22,50	12,15	0,94	0,51
	a_n , МПа	218,68		159,11		0,73
Б-УП	σ_p , МПа	647,77	633,60	597,48	0,98	0,92
	E_p , ГПа	70,82	72,48	74,28	1,02	1,05
	σ_u , МПа	660,24	587,81	523,86	0,89	0,79
	E_u , ГПа	50,84	50,74	48,89	1,00	0,96
	a_n , МПа	91,08		269,51		2,96

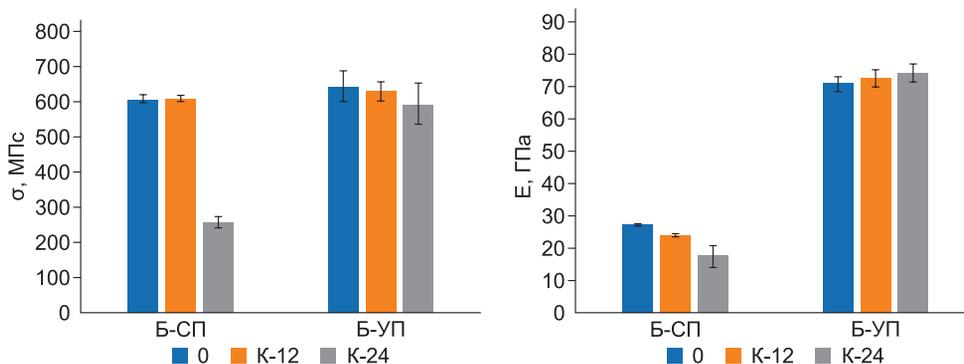


Рис. 8. Гистограмма механических показателей при растяжении биозараженных слоистых пластиков

Fig. 8. Histogram of mechanical parameters during the tension of biocontaminated laminates

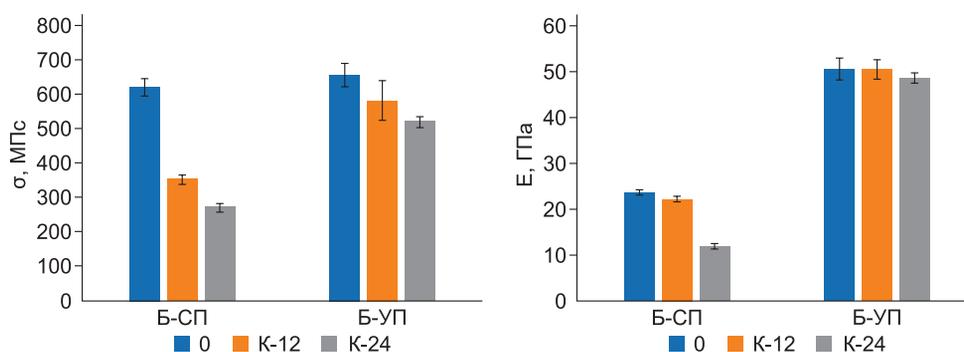


Рис. 9. Гистограмма механических показателей при изгибе биозараженных слоистых пластиков

Fig. 9. Histogram of mechanical parameters during the bending of biocontaminated laminates

вое состояние и свойства полимеров, а также разрабатывать методы защиты от биодеструкции. Это позволит повысить устойчивость материалов к комплексным воздействиям окружающей среды и продлить срок их службы.

Список литературы / References

1. Каблов Е.Н., Старцев О.В. Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях (обзор). *Авиационные материалы и технологии*. 2015; Т.4(37):38–52.
Kablov E.N., Startsev O.V. Basic and applied research and aging of materials under climatic conditions (review). *Aviation materials and technologies*. 2015; Т.4(37):38–52. (In Russ.)
2. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Медведев И.М. Обзор зарубежного опыта исследований коррозии и средств защиты от коррозии. *Авиационные материалы и технологии*. 2015;2(35):76–87.
Kablov E.N., Startsev O.V., Medvedev I.M. Review of foreign experience in corrosion research and corrosion protection products. *Aviation materials and technologies*. 2015;2(35):76–87. (In Russ.)
3. Kablov E.N., Startsev O.V., Krotov A.S et al. Climatic aging of composite materials: 1. Aging mechanisms. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2011;10:993–1000.

4. Kablov E.N., Startsev O.V., Krotov A.S., et al. Climatic aging of composite aviation materials: 2. Relaxation of the initial structural nonequilibrium and through thickness gradient of properties. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2011;(10):1001–1007.

5. Kablov E.N., Startsev O.V., Krotov A.S., et al. Climatic aging of composite aviation materials: 3. Significant aging factors. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2012;(4). 323–329.

6. Кузьмин Д.А. Использование монотерпеноидов в качестве средств защиты промышленных материалов от микробиологических повреждений: Автореф. дис. канд. биол. наук. Нижний Новгород; 2006. 27 с.

7. Kuzmin D.A. Use of monoterpenoids as means of protecting industrial materials from microbiological damage: Abstr. Sc.D. Diss. Biol.Sci. Nizhniy Novgorod; 2006. 27 s. (In Russ.)

7. Кряжев Д.В. Экологические основы диагностики процессов биодеструкции природных и синтетических полимерных материалов в условиях воздействия ряда абиотических факторов внешней среды: : Автореф. дис. докт. биол. наук. Нижний Новгород; 2014. 305 с.

- Kryazhev D.V. Ecological basis for diagnosing the processes of biodegradation of natural and synthetic polymeric materials under the influence of a number of abi-

otic environmental factors: Abstr. Sc.D. Diss. Biol. Sci. Nizhniy Novgorod; 2014. 305 s. (In Russ.)

8. Кычкин А.А., Кычкин А.К., Туйсов А.Г. Создание гибридных композиционных полимерных материалов для исследования взаимосвязей “структура-технология” при длительном воздействии климатических факторов. В кн.: Лукин Е.С. (ред.) *EURASTRENCOLD-2022: Сборник трудов X Евразийского симпозиума по проблемам прочности и ресурса в условиях климатически низких температур, посвященный 100-летию образования ЯАССР и 300-летию Российской Академии наук, г. Якутск, 12–16 сентября 2022 года*. Киров: Межрегиональный центр инновационных технологий в образовании; 2022. С. 250–257.

Kychkin A.A., Kychkin A.K., Tuisov A.G. Creation of hybrid composite polymer materials for studying the “composition-structure-technology” relationships under long-term exposure to climatic factors. In: Lukin E.S. (ed.) *EURASTRENCOLD-2022: Proceedings of the 10th Eurasian Symposium on problems of strength and resource in conditions of climatic low temperatures, dedicated to the 100th anniversary of the YASSR and the 300th anniversary of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, September 12–16, 2022*. Kirov: Interregional Center for Innovative Technologies in Education; 2022, pp. 250–257. (In Russ.)

9. Копырин М.М., Марков А.Е., Иванов А.Н. и др. Исследование упруго-прочностных свойств гибридных композиционных пластиков. В кн.: Лукин Е.С. (ред.) *EURASTRENCOLD-2022: Сборник трудов X Евразийского симпозиума по проблемам прочности и ресурса в условиях климатически низких температур, посвященный 100-летию образования ЯАССР и 300-летию Российской Академии наук, г. Якутск, 12–16 сентября 2022 года*. Киров: Межрегиональный центр инновационных технологий в образовании; 2022. С. 233–237.

Kopyrin M.M., Markov A. E., Ivanov A.N., et al. Study of elastic-strength properties of hybrid composite plastics. In: Lukin E.S. (ed.) *EURASTRENCOLD-2022: Collection of proceedings of the 10th Eurasian Symposium on problems of strength and resource in conditions of climatic low temperatures, dedicated to the 100th anniversary of the formation of the YASSR and the 300th anniversary of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, September 12–16, 2022*. Kirov: Interregional Center for Innovative Technologies in Education; 2022, pp. 233–237. (In Russ.)

10. Кычкин А.А., Кычкин А.К., Туйсов А.Г., и др. Прочностные свойства комбинированных полимерных композиционных пластиков из базальто- угле- тканей, полученных методом инфузии. В кн.: Лукин Е.С. (ред.) *EURASTRENCOLD-2023: Сборник трудов XI Евразийского симпозиума по проблемам прочности и ресурса в условиях климатически низких температур, посвященного 85-летию со дня рождения академика В.П. Ларионова, г. Якутск, 11–15 сентября 2023 года*. Киров: Межрегиональный центр

инновационных технологий в образовании; 2023. С. 324–329.

Kychkin A.A., Kychkin A.K., Tuisov A.G., et al. Strength properties of combined polymer composite plastics from basalt-carbon fabrics obtained by infusion. In: Lukin E.S. (ed.) *EURASTRENCOLD-2023: Proceedings of the 10th Eurasian Symposium on problems of strength and resource in conditions of climatic low temperatures, dedicated to the 85th anniversary of the Academician V.P. Larionov, Yakutsk, 11–15 September 2023*. Kirov: Interregional Center for Innovative Technologies in Education, 2023, pp. 324–329. (In Russ.)

11. Кычкин А.К., Ерофеевская Л.А., Кычкин А., et al. Investigation of biofouling and its effect on the properties of basalt fiber reinforced plastic rebars exposed to extremely cold climate conditions. *Polymers*. 2022;(14): 369. <https://doi.org/10.3390/polym14030369>.

12. Ерофеевская Л.А., Кычкин А.К., Кычкин А.А. и др. Исследование биологического воздействия на базальтопластиковую арматуру. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2022;27(1):153–167. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-1-153-167>.

Erofeevskaya L.A., Kychkin A.K., Kychkin A.A., et al. Research of biological effects on basaltoplastic rebars. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022;27(1): 153–167. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-1-153-167>. (In Russ.)

13. Курс М.Г., Николаев Е.В., Абрамов Д.В. Натурно-ускоренные испытания металлических и неметаллических материалов: ключевые факторы и специализированные стенды. *Авиационные материалы и технологии*. 2019;54(1):66–73. HYPERLINK “<https://doi.org/10.18577/2071-9140-2019-0-1-66-73>”<https://doi.org/10.18577/2071-9140-2019-0-1-66-73>

Kurs M.G., Nikolaev E.V., Abramov D.V. Full-scale accelerated testing of metallic and non-metallic materials: key factors and specialized stands. *Aviation Materials and Technologies*. 2019;54(1):66–73. (In Russ.)

14. Chin J.W. Durability of Composites for Civil Structural Applications. *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering*. 2007;80–97.

15. Николаев Е.В., Барботько С.Л., Андреева Н.П. и др. Комплексное исследование воздействия климатических и эксплуатационных факторов на новое поколение эпоксидного связующего и полимерных композиционных материалов на его основе. Часть 4. Натурные климатические испытания полимерных композиционных испытаний на основе эпоксидной матрицы. *Труды ВИАМ*. 2016;42(6):93–108.

Nikolaev E.V., Barbotko S.L., Andreeva N.P., et al. A comprehensive study of the impact of climatic and operational factors on a new generation of epoxy binders and polymer composite materials based on them. *Trudy VIAM*. 2016;42(6):93–108. (In Russ.)

16. Павлов М.Р., Николаев Е.В., Андреева Н.П. и др. К вопросу о методике оценки стойкости полимерных материалов к воздействию солнечного излучения (обзор). *Труды ВИАМ*. 2016;7(43):11.

Pavlov M.R., Nikolaev E.V., Andreeva N.P., et al. On the issue of methods for assessing the resistance of polymer materials to solar radiation (review). *Trudy VIAM*. 2016;7(43):11. (In Russ.)

17. Винокуров Г.Г., Стручков Н.Ф., Кычкин А.К. и др. Оценка предельных значений пористости базальтопластиковых композиционных материалов при климатических испытаниях в условиях Севера. *Химическая технология*. 2022;23(6):270–279. <https://doi.org/HYPERLINK> “<https://doi.org/10.31044/1684-5811-2022-23-6-270-279>”10.31044/1684-5811-2022-23-6-270-279

Vinokurov G.G., Struchkov N.F., Kychkin A.K., et al. Assessment of the limiting values of porosity of basalt-plastic composite materials during climatic tests in the North. *Khimicheskaya Tekhnologiya*. 2022;23(6):270–279.

<https://doi.org/10.31044/1684-5811-2022-23-6-270-279>. (In Russ.)

18. Васильева Е.Д., Ерофеевская Л.А., Стручков Н.Ф. и др. Поверхностная деструкция полимерных композиционных материалов в условиях Севера. В кн.: *Всероссийская конференция “XXIV Всероссийское совещание по неорганическому и органосиликатным покрытиям”*: Сборник тезисов докладов, г. Санкт-Петербург, 05–09 июня 2023 года. Санкт-Петербург: ООО “Издательство “ЛЕМА”; 2023. С. 56–59.

Vasileva E.D., Erofeevskaya L.A., Struchkov N.F., et al. Surface destruction of polymer composite materials in the North. In: *All-Russian conference “24th All-Russian meeting on inorganic and organosilicate coatings”*: Proceedings, St. Petersburg, June 05–09, 2023. St. Petersburg: LEMA Publishing House LLC, 2023, pp. 56–59. (In Russ.)

Об авторах

КЫЧКИН Анатолий Константинович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-5276-5713>, ResearcherID: D-9234-2014, Scopus Author ID: 35300061400, SPIN: 2885-9914, e-mail: kychkinplasma@mail.ru

КЫЧКИН Айсен Анатольевич, кандидат технических наук, научный сотрудник, Якутский научный центр, г. Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0003-1540-8140>, ResearcherID: ABA-4932-2020, Scopus Author ID: 57215690274, SPIN: 5724-1789, e-mail: icen.kychkin@mail.ru

СТРУЧКОВ Николай Федорович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0003-3078-0709>, ResearcherID: C-7166-2014, Scopus Author ID: 35335217600, SPIN: 4524-7540, e-mail: struchkov_n@rambler.ru

Вклад авторов

Кычкин А.К. – концептуализация, создание и редактирование рукописи, методология, администрация проекта; **Кычкин А.А.** – формальный анализ, написание – рецензирование и редактирование; **Стручков Н.Ф.** – формальный анализ, визуализация

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

KYCHKIN, Anatoly Konstantinovich, Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-5276-5713>, ResearcherID: D-9234-2014, Scopus Author ID: 35300061400, SPIN: 2885-9914, e-mail: kychkinplasma@mail.ru

KYCHKIN, Aisen Anatolyevich, Cand. Sci. (Eng.), Researcher, Laboratory of Composite Materials to the Arctic and Subarctic, Yakut Scientific Centre of the SB RAS, Yakutsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-1540-8140>, ResearcherID: ABA-4932-2020, Scopus Author ID: 57215690274, SPIN: 5724-1789, e-mail: icen.kychkin@mail.ru

STRUCHKOV, Nikolay Fedorovich, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Larionov Institute of the Physical and Technical Problems of the North SB RAS, Yakutsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-3078-0709>, ResearcherID: C-7166-2014, Scopus Author ID: 35335217600, SPIN: 4524-7540, e-mail: struchkov_n@rambler.ru

Authors' contribution

Kychkin A.K. – conceptualization, writing—original draft preparation, methodology, project administration; **Kychkin A.A.** – formal analysis, writing—review and editing; **Struchkov N.F.** – formal analysis, visualization

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 08.07.2024

Поступила после рецензирования / Revised 18.02.2025

Принята к публикации / Accepted 20.02.2025