



Научная статья
2.6.17 – Материаловедение (технические науки).
УДК 621

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.01.035

EDN:TMWVIT

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ УГЛЕПЛАСТИКА ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР

Михаил Михайлович Копырин¹, Марк Григорьевич Петров²,
Олег Владимирович Старцев³, Михаил Петрович Лебедев⁴

^{1, 2, 3} Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр СО РАН», г. Якутск, Россия

¹ mkopyrin91@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8204-0000>

³ startsevov@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-8231-7157>

⁴ m.p.lebedev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0086-9921>

⁴ Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С.А., Новосибирск, Россия,

⁴ mark-stein@list.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. В статье приведены результаты экспериментального исследования влияния арктических климатических факторов на физико-механические свойства углеродных полимерных композиционных материалов. Объектом исследования служили пластины углепластика, экспонированные в различных условиях: в помещении (контроль), на открытой площадке при естественном климатическом воздействии и при искусственном термогигроциклировании. В ходе экспонирования контролировались масса и геометрические параметры образцов, а также оценивалась сорбция влаги. Изменение массы аппроксимировалось по модели диффузии Фика; для термогигроциклированных пластин определён коэффициент диффузии $D = 0,215 \text{ мм}^2/\text{сут}$ при $R^2 = 0,92$, что указывает на высокую точность описания экспериментальных данных. Испытания на продольный изгиб при различных скоростях нагружения ($0,01\text{--}1 \text{ мм/с}$) показали, что после климатического воздействия прочность изменяется незначительно, но различия между сериями выражены. Образцы, экспонированные в естественных условиях, показали повышение прочности до 6 %, тогда как при термогигроциклировании прочность снизилась до 19 %. Установлено, что циклические перепады температуры и влажности вызывают накопление микрповреждений и внутренних напряжений, что ведёт к деградации структуры и снижению долговечности материала.

Ключевые слова: углепластик, полимерный композиционный материал, арктические условия, климатическое старение, термогигроциклирование, диффузия влаги, прочность, долговечность.

Финансирование: Работа выполнена в рамках ГЗ МОН РФ №FWRS-2025-0027.

Для цитирования: Экспериментальная оценка прочности углепластика после воздействия отрицательных температур / М. М. Копырин [и др.] // Ползуновский вестник. 2026. № 1. С. 224–229. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2026.01.035. EDN: <https://elibrary.ru/TMWVIT>.

Original article

EXPERIMENTAL EVALUATION OF CARBON FIBER COMPOSITE STRENGTH AFTER EXPOSURE TO SUBZERO TEMPERATURES

Mikhail M. Kopyrin¹, Mark G. Petrov², Oleg V. Startsev³, Mikhail P. Lebedev⁴

^{1, 2, 3} Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”, Yakutsk, Russia

¹ mkopyrin91@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8204-0000>

³ startsevov@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-8231-7157>

⁴ m.p.lebedev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0086-9921>

⁴ S.A. Chaplygin Siberian Aeronautical Research Institute, Novosibirsk, Russia,

⁴ mark-stein@list.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Abstract. The article presents the results of an experimental study on the influence of Arctic climatic factors on the physical and mechanical properties of carbon fiber polymer composite materials. The research focused on carbon fiber-reinforced plastic, exposed under different conditions: indoors (control), outdoors under natural climatic influences, and under artificial thermo-hygrocycling. During exposure, the specimens' mass and geometric parameters were monitored, and moisture sorption was evaluated. The mass change was approximated using Fick's diffusion model; for thermo-hygrocycled plates, the diffusion coefficient was determined as $D = 0.215 \text{ mm}^2/\text{day}$ with $R^2 = 0.92$, indicating high accu-

© Копырин М. М., Петров М. Г., Старцев О. В., Лебедев М. П., 2026

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ УГЛЕПЛАСТИКА ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР

racy of the experimental fit. Longitudinal bending tests at various loading rates (0.01-1 mm/s) showed that after climatic exposure, strength varied slightly, though the trends were distinct. Samples exposed under natural conditions demonstrated up to a 6% increase in strength, while thermo-hygrocycled specimens exhibited a decrease of up to 19%. It was established that cyclic fluctuations of temperature and humidity lead to the accumulation of microdefects and internal stresses, resulting in structural degradation and reduced durability of the material.

Keywords: carbon fiber composite, polymer composite material, Arctic conditions, climatic aging, thermo-hygrocycling, moisture diffusion, strength, durability.

Funding: The study was funded by the State Assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No. FWRS-2025-0027.

For citation: Kopyrin, M. M., Petrov, M. G., Startsev, O. V. & Lebedev, M. P. (2026). Experimental evaluation of carbon fiber composite strength after exposure to subzero temperatures. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 224-229. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2026.01.035. EDN: <https://elibrary.ru/TMWVIT>.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия наблюдается устойчивый рост интереса к применению полимерных композиционных материалов (ПКМ) в авиационной, космической, энергетической и транспортной отраслях, что обусловлено их уникальным сочетанием низкой плотности, высокой удельной прочности и жёсткости, а также коррозионной стойкостью и возможностью оптимизации конструкции по массе. Широкое распространение ПКМ связано также с развитием технологий направленного армирования, препрегов и автоклавного формования, позволяющих получать изделия со стабильными эксплуатационными характеристиками и высокой точностью геометрии. Среди различных типов композиционных материалов особое внимание уделяется углерод-армированным пластикам (УП), которые благодаря своей высокой удельной прочности и жёсткости, устойчивости к усталостным нагрузкам и химическим воздействиям стали неотъемлемым элементом современных ответственных конструкций [1–3].

При этом требования к надёжности и долговечности таких материалов в условиях эксплуатации возрастают, особенно при воздействии экстремальных факторов внешней среды – резких колебаний температуры, повышенной влажности, ультрафиолетового излучения и кислородосодержащих атмосфер [4, 5]. Эти воздействия могут вызывать деградацию матрицы, ослабление межфазного взаимодействия и накопление остаточных напряжений, что приводит к изменению физико-механических свойств, в частности модуля упругости, температуры стеклования и коэффициента линейного термического расширения.

Воздействие перепада температур на эксплуатационные характеристики углепластиков обусловлено особенностями термомеханического поведения как полимерной матрицы, так и армирующих волокон, которые по-разному реагируют на охлаждение и последующее нагревание. При циклических переходах через нулевую температуру в материале возникают значительные внутренние напряжения, связанные с различиями в коэффициентах термического расширения компонентов композита [6]. Накопление таких напряжений в процессе многократного термоциклирования приводит к постепенному развитию микроразрывов, локальной деформации матрицы и инициированию межслоевых дефектов. С течением времени наблюдается ослабление межфазной адгезии, расслоение и образование микротрещин как в матрице, так и на границе раздела «волокно–матрица», что снижает эффективность передачи нагрузки между компонентами и, как следствие, уменьшает несущую способность материала. Кроме того, возникающие при этом внутренние дефекты нарушают целостность структуры и снижают демпфи-

рующие свойства композита, ухудшая его способность к поглощению вибрационных и ударных воздействий [7, 8]. На микроскопическом уровне эти процессы сопровождаются изменением релаксационного поведения связующего, перераспределением остаточных напряжений и развитием зон локальной пластичности, что приводит к частичной перестройке надмолекулярной структуры полимера. В результате меняются ключевые физико-механические параметры углепластика – модуль упругости, предел прочности, температура стеклования и тангенс угла механических потерь, что отражает общую деградацию структуры и накопление повреждений в материале [4, 9]. Таким образом, воздействие низких температур и многократные циклы замораживания–оттаивания следует рассматривать как один из наиболее критичных факторов климатического старения углепластиков, оказывающих долговременное влияние на их эксплуатационную надёжность и ресурс.

Актуальной задачей является установление изменения прочности углепластика после воздействия перепада и отрицательных температур. Результаты длительных наблюдений показывают, что уже спустя пять лет предел прочности и модуль упругости углепластиков могут снижаться более чем на 20 % [10], что подтверждает необходимость анализа коэффициента относительного сохранения свойств $k_P = P/P_0$, характеризующего степень деградации [11–12].

Таким образом, исследование влияния отрицательных температур на прочностные свойства углепластика имеет важное значение для оценки эксплуатационной надёжности конструкций из ПКМ и разработки методов прогнозирования их ресурса. Цель настоящей работы заключается в экспериментальной оценке изменений прочностных характеристик углепластика после воздействия отрицательных температур.

МЕТОДЫ

Для изучения особенностей влияния арктических климатических факторов на механико-прочностные характеристики ПКМ использовались три пластины препрега УП, сформированные из 12 слоёв углеродной ткани марки ACM C200T с саржевым переплетением. В качестве связующего применялась эпоксидная смола марки ACM 102. Размеры полученных пластин составили 200×300 мм при толщине 2,6–2,7 мм.

Для проведения испытаний на продольный изгиб из данных пластин ACM 102-C200T были изготовлены образцы размером 145×30×2,6 мм. Испытания выполнялись на образцах, вырезанных из трех идентичных пластин углепластика, которые предварительно подвергались экспозиции в различных климатических условиях. Нагружение осуществлялось по схеме перемещения подвижной шарнирной опоры испытательной машины BiSS с максимальным усилием 10 кН.

В ходе экспозиции проводился контроль изменений массы и геометрических параметров исследуемого материала

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Ниже, на рисунке 1, проанализированы усреднённые значения ключевых метеорологических параметров для г. Якутска за последние десять лет.

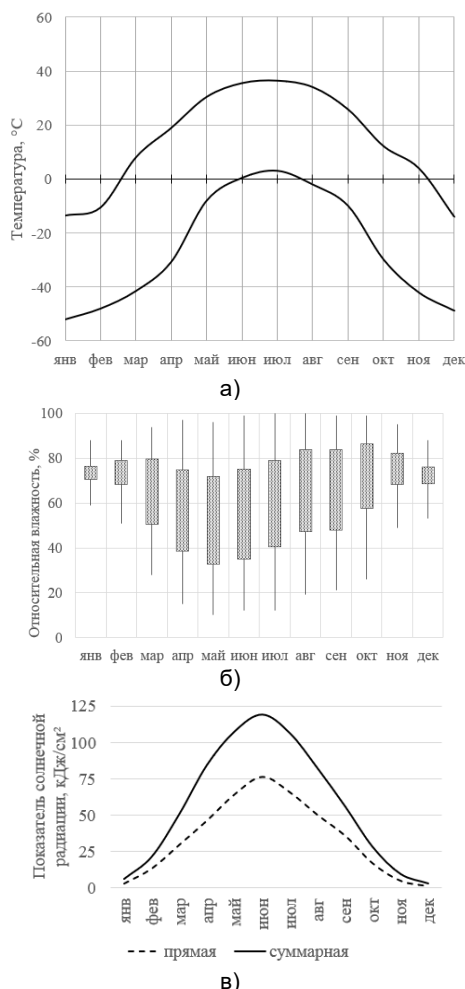


Рисунок 1 – Показатели температуры (а), относительной влажности (б) и солнечной радиации (в) в г. Якутске

Figure 1 – Temperature (a), relative humidity (b), and solar radiation (c) in Yakutsk

Как видно из приведённых данных, климат города Якутска характеризуется как экстремально холодный климат. Стоит отметить, что солнечная радиация и УФ-облучение в период зимы и межсезонья минимальны. Наблюдается длительный период низких температур, удерживающихся на уровне ниже 0 °C в течение 7-8 месяцев, не считая редких кратковременных понижений температуры, зафиксированных в мае и августе. Диапазон температурных колебаний с переходом через нулевую отметку формируется в период межсезонья – с конца февраля до середины мая и с начала сентября до начала ноября, что в сумме составляет около 5 месяцев. Как было представлено ранее, именно такие циклические переходы температуры через нулевую точку (термофлуктуационные воздействия) оказывают значительное влияние на структуру ПКМ, вызывая внутренние

напряжения, микродефекты и, как следствие, снижение его прочностных характеристик и долговечности.

На основании полученных метеорологических данных была разработана схема экспонирования исследуемых образцов. Первая пластина находилась в помещении (в лаборатории) и использовалась в качестве контрольного образца, не подвергавшегося воздействию внешней среды. Вторая пластина в зимний период размещалась на открытой площадке, где испытывала прямое влияние климатических факторов – низких температур, влажности и солнечной радиации. Третья пластина подвергалась ежедневному термогигроциклированию: половину суток она экспонировалась при отрицательных температурах на открытом воздухе, а вторую половину – погружалась в водяную ванну, нагретую до 60 °C. Такой экспериментальный режим позволил имитировать реальные суточные и сезонные колебания температуры, а также комплексное воздействие климатических факторов на исследуемый материал.

В таблице 1 представлены основные параметры, определяющие условия экспонирования пластин, а также продолжительность воздействия каждого климатического режима.

Таблица 1 – Схема экспонирования пластин

Table 1 – Exposure scheme of the plates

№	Условия	Факторы	Количество времени / циклов
1	Лаборатория (контрольная)	–	–
2	Открытая площадка	RH, T, UV	36 дней
3	Термогигроциклирование	RH↔100% T↔60 C	36 дней / 30 циклов

На основании полученных весовых данных изменение массы образцов было аппроксимировано методом наименьших квадратов с применением классической модели диффузии Фика:

$$\frac{M(t)}{M_{\infty}} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\exp\left(-\frac{D}{l^2}(2n+1)^2 \pi^2 t\right)}{(2n+1)^2}, \quad (1)$$

где M_{∞} – предельное содержание влаги в материале, D – коэффициент диффузии влаги, t – время воздействия влаги, h – половина толщины образца. Адекватность аппроксимации оценивалась по значению коэффициента детерминации R^2 , который отражает степень соответствия экспериментальных данных выбранной модели:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{n=1}^N (M(t_n) - M_n)^2}{\left(M_n - \sum_{n=1}^N M_n / N\right)^2}. \quad (2)$$

На рисунке 2 представлена зависимость, отражающая усреднённые значения кинетики сорбции влаги в исследуемом материале.

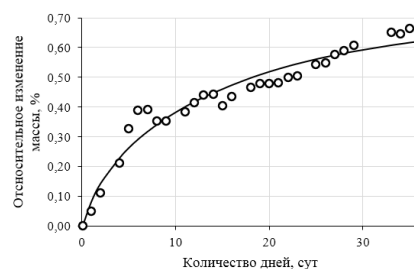


Рисунок 2 – Кинетика сорбции влаги образцов подвергнутых термогигроциклированию

Figure 2 – Moisture sorption kinetics of specimens subjected to thermo-hygrocyling

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ УГЛЕПЛАСТИКА ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР

Усредненный коэффициент диффузии влаги для пластин № 3 составил $D = 0,215 \text{ мм}^2/\text{сут}$, при этом степень детерминированности аппроксимации равнялась $R^2 = 0,92$. В таблице 2 приведены результаты изменения массы и толщины исследуемых образцов в процессе экспозиции.

Таблица 2 – Изменение весовых и геометрических показателей пластин

Table 2 – Changes in weight and geometric parameters of the plates

№	Δm , %	Δh , мм
1	+0,02	б/и*
2	+0,03	б/и
3	+0,77	+0,02

* где б/и – без изменений

Образцы, находившиеся в открытых условиях, не продемонстрировали заметных изменений весовых и геометрических параметров. В то же время термогигроциклированные образцы выявили увеличение как массы, так и толщины, что указывает на более интенсивное влагопоглощение и структурные изменения материала под воздействием чередующихся температурно-влажностных циклов.

После проведения экспонирования в различных климатических условиях наибольший интерес представляло изменение прочностных характеристик материала. С этой целью из каждой пластины были вырезаны образцы для испытаний на продольный изгиб. Для оценки состояния материала была выбрана программа нагружения, обеспечивающая наиболее полное проявление его механического отклика. В первом варианте испытаний нагружение осуществлялось по схеме, представленной на рисунке 3.

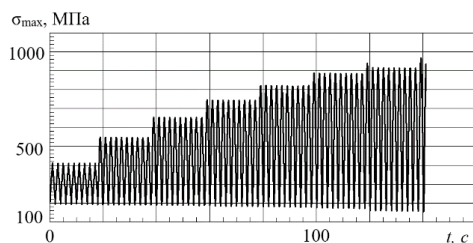


Рисунок 3 – Схема нагружения при испытаниях на продольный изгиб с нарастающей амплитудой

Figure 3 – Loading scheme for longitudinal bending tests with increasing amplitude

Во втором случае испытания выполнялись в режиме монотонного нагружения, при котором перемещение подвижного захвата испытательной машины осуществлялось с тремя фиксированными скоростями: 1 мм/с, 0,1 мм/с и 0,01 мм/с. Соответствующая схема проведения испытаний представлена на рисунке 4.

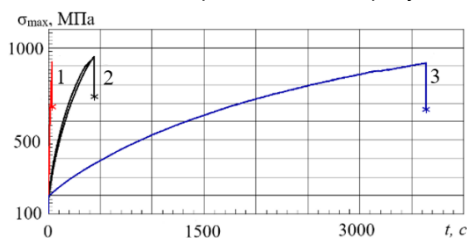


Рисунок 4 – Схема нагружения образцов при различных скоростях: 1 – 1 мм/с, 2 – 0,1 мм/с, 3 – 0,01 мм/с

Figure 4 – Loading scheme of specimens at different speeds: 1 – 1 mm/s, 2 – 0.1 mm/s, 3 – 0.01 mm/s

В таблице 3 приведены усреднённые значения прочностных характеристик образцов из различных пластин при испытаниях с нарастающей амплитудой нагружения.

Таблица 3 – Усреднённые значения прочностных характеристик при нарастающем нагружении

Table 3 – Averaged strength values under increasing load

№ пластины	$\sigma_{\max}$, МПа	k_p
1	950,7	–
2	1003,6	1,06
3	922,7	0,97

Из данных таблицы видно, что при нарастающем размахе нагружения прочностные характеристики образцов после экспонирования изменяются в сравнительно узком диапазоне. Средние значения прочности образцов из пластины № 2 демонстрируют незначительное повышение – до 6 %, тогда как образцы, подвергавшиеся термовлагодиклированию, напротив, показывают снижение прочности примерно на 3 %. Несмотря на небольшие различия, такие отклонения могут указывать на внутренние структурные преобразования в материале, вызванные воздействием климатических факторов. В таблице 4 представлены усредненные результаты изменения прочности образцов из пластин при различных скоростях нагружения.

Таблица 4 – Усредненные результаты изменения прочности при различных скоростях нагружения

Table 4 – Average values of strength variation at different loading rates

№	Скорость, мм/с	$\sigma_{\max}$, МПа	k
1	1	923,6	–
	0,1	952,5	–
	0,01	918,3	–
2	1	940,1	1,02
	0,1	952,1	0,99
	0,01	946,1	1,03
3	1	751,4	0,81
	0,1	783,8	0,82
	0,01	835,7	0,91

В данной таблице наиболее наглядно представлено различие во влиянии условий экспонирования на прочностные характеристики образцов из различных пластин. Отчётливо видно, что для пластины № 3 наблюдается снижение прочности, что свидетельствует о воздействии перепадов температуры и влажности, вызывающих возникновение внутренних напряжений в структуре материала и, как следствие, уменьшение его несущей способности. Падение прочности достигает 19 % по сравнению с исходным значением. Средний коэффициент сохранения прочности составил 0,85, что является достаточно заметным снижением, учитывая, что общее количество циклов температурно-влажностного воздействия составило всего 36. Пластина, экспонированная лишь в открытых атмосферных условиях, практически сохранила свои прочностные свойства – средний коэффициент составил 1,01. Наибольший интерес при этом представляет различие во времени разрушения образцов, что подробно показано в таблице 5.

Таблица 5 – Время разрушения в зависимости от скорости нагружения

Table 5 – Failure time depending on the loading rate

№	Скорость, мм/с	Время разрушения, сек
1	1	36,8
	0,1	855,5
	0,01	3637,6
2	1	39,3
	0,1	385
	0,01	3891,9
3	1	27
	0,1	295,4
	0,01	3103,3

Из данных таблицы отчётливо прослеживается кинетика разрушения материала при различных скоростях нагружения. При минимальной (0,01 мм/с) и максимальной (1 мм/с) скоростях деформирования наилучшие прочностные показатели продемонстрировала пластина № 2, экспонированная в открытых атмосферных условиях, где средняя температура в течение 36 суток испытаний варьировала от -45 до -12 °С. Подобное поведение материала может свидетельствовать о протекании релаксационных процессов в структуре полимера при отсутствии интенсивного солнечного и ультрафиолетового излучения (в зимний период), несмотря на воздействие отрицательных температур. В то же время образцы, подвергавшиеся термогигроциклированию, демонстрировали наименьшее время до разрушения при всех рассмотренных скоростных режимах нагружения, что указывает на повышенную чувствительность материала к циклическому воздействию температуры и влаги. На рисунке 5 представлены данные по усредненным значениям жесткости образцов, полученных при нагружении образцов при различных скоростях. При этом у всех образцов вне зависимости от скорости нагружения, максимумы жесткости доходили в области $\sigma_{сж} = 500 \pm 100$ МПа.

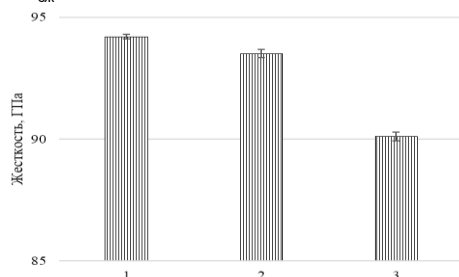


Рисунок 5 – Усредненные показатели жесткости пластин при различных скоростях

Figure 5 – Average stiffness values of the plates at different loading rates

На рисунке показано изменение жёсткости при сжатии для образцов, вырезанных из трёх пластин, экспонированных в различных условиях. Наблюдается снижение жёсткости от контрольных образцов к материалу, подвергнутому термогигроциклированию. Разница между первыми двумя пластинами незначительна, тогда как у третьей жёсткость заметно ниже (на 4–5 % от контрольной). На рисунке 6 представлен пример разрушения образца из пластины № 3 во время испытаний.

С увеличением длительности нагружения у образцов из пластины 3 наблюдается возрастание степени межслойного расслоения, сопровождающееся изменением характера разрушения материала. По мере роста времени воздействия усиливается дегра-

дация связующего и снижается его способность передавать нагрузку между слоями, тогда как для пластин 1 и 2 данный эффект выражен значительно слабее.



Рисунок 6 – Типовое разрушение на примере образца из пластины 3

Figure 6 – Typical failure pattern shown by a specimen from plate 3

Проведённые исследования показали влияние арктических климатических факторов и чередующихся температурно-влажностных циклов на прочностные характеристики ПКМ. Установлено, что наибольшее снижение прочности наблюдается у образцов, подвергшихся термогигроциклированию, что подтверждает их высокую чувствительность к комбинированному воздействию влаги и температуры. В то же время образцы, экспонированные исключительно в естественных условиях в период зимы, практически сохранили исходные механические свойства, что указывает на их устойчивость к длительному воздействию низких температур при отсутствии резких климатических колебаний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые исследования показали, что воздействие арктических климатических факторов приводит к заметным изменениям свойств полимерных композиционных материалов, особенно при сочетании температурных и влажностных циклов. Анализ кинетики сорбции влаги подтвердил, что процесс влагопоглощения подчиняется модели диффузии Фика с высокой степенью достоверности аппроксимации. Для пластины № 3, подвергавшейся термогигроциклированию, коэффициент диффузии составил $D = 0,215$ мм²/сут, что свидетельствует о более интенсивном проникновении влаги в структуру материала. При этом у остальных пластин, находившихся в помещении и открытых условиях экспонирования, существенных изменений массы и толщины не наблюдалось.

Испытания на продольный изгиб с нарастающим размахом перемещений показали, что прочность материала после экспонирования изменяется незначительно, однако различия между сериями образцов остаются заметными. Образцы из пластины № 2, экспонированные в открытых условиях, продемонстрировали небольшое повышение прочности (до 6 %), тогда как образцы, подвергавшиеся термогигроциклированию, напротив, показали снижение прочности примерно на 3 %.

Результаты испытаний при различных скоростях нагружения подтвердили, что наиболее интенсивная деградация свойств наблюдается у образцов, прошедших термогигроциклирование, снижение прочности достигало 19 % от исходного уровня, усредненный коэффициент сохранения прочности составил 0,85. В то же время пластина, экспонированная только в естественных условиях, практически сохранила исходные механические характеристики (коэффициент равен 1,01).

Анализ времени разрушения показал, что при

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ УГЛЕПЛАСТИКА ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУР

низких и высоких скоростях нагружения наибольшую стойкость проявили образцы, экспонированные в открытых условиях, в то время как термогигроциклированные разрушались быстрее при всех скоростных режимах. Это свидетельствует о накоплении внутренних напряжений и дефектов, ускоряющих деградацию структуры.

Таким образом, можно утверждать, что в арктических климатических условиях основное воздействие на прочность ПКМ оказывает именно температурный перепад, тогда как устойчиво низкие температуры сами по себе оказывают минимальное влияние на их структуру и механические характеристики. Наибольшие изменения наблюдаются при чередовании температур выше и ниже нуля, сопровождающемся воздействием влаги, что приводит к термогигронапряжениям, микродефектам в матрице и снижению прочности материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fiber-reinforced composites for aerospace, energy, and marine applications: an insight into failure mechanisms under chemical, thermal, oxidative, and mechanical load conditions / A.K. Hamzat [et al.] // *Advanced Composites and Hybrid Materials*. 2025. Vol. 8. P. 152. Doi: 10.1007/s42114-024-01192-y.
2. Patole R., Ambhore N., Agrawal D. Carbon composites in aerospace application – a comprehensive review // *Materials International*. 2023. Vol. 5, № 4. P. 1–12. Doi: 10.33263/Materials54.002.
3. Designing of carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) composites for a second-life in the aeronautic industry: strategies towards a more sustainable future / C. Borges [et al.] // *Frontiers in Materials*. 2023. Vol. 10. P. 1–12. Doi: 10.3389/fmats.2023.1179270.
4. The Formation of Microcracks during Climatic Aging of Polymer-Composite Materials / M.P. Lebedev [et al.] // *Polymer Science. Series D*. 2023. Vol. 16, № 1. P. 116–123. Doi: 10.1134/s199542122301015x.
5. The Initial Stage of Climatic Aging of Basalt-Reinforced and Glass-Reinforced Plastics in Extremely Cold Climates: Regularities / A.K. Kychkin [et al.] // *Polymers*. 2024. Vol. 16, № 7. P. 866. Doi: 10.3390/polym16070866.
6. Измерение и анализ количества циклов «замораживание-оттаивание» эпоксидных стекло- и углепластиков в условиях экстремально холодного климата / А.К. Кычкин [и др.] // *Южно-Сибирский научный вестник*. 2025. № 3(61). С. 129–141. Doi: 10.25699/SSSB.2025.61.3.017.
7. Jafari A., Ashrafi H., Bazli M., Ozbakkaloglu T. Effect of thermal cycles on mechanical response of pultruded glass fiber reinforced polymer profiles of different geometries // *Composite Structures*. 2019. Vol. 223. P. 110959. Doi: 10.1016/j.compstruct.2019.110959.
8. Fikry M.J.M., Ogihara S., Vinogradov V. The effect of matrix cracking on mechanical properties in FRP laminates // *Mechanics of Advanced Materials and Modern Pro-*

cesses. 2018. Vol. 4. Article No. 3. Doi: 10.1186/s40759-018-0036-0.

9. Коваль Т.В., Велигодский И.М., Громова А.А. Исследование пластифицирующего влияния влаги на свойства ПКМ на основе эпоксидного связующего ВСЭ-34 после 5 лет экспозиции в различных климатических зонах // *Труды ВИАМ*. 2021. № 9(103). С. 105–116.

10. Virgillito E., Sisca L., Carello M. Influence of freeze-thaw aging on the impact performance of damped carbon fiber reinforced plastics for automotive applications // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, № 8. P. 4020. Doi: 10.3390/app12084020.

11. Effect of accelerated aging temperature under artificial seawater on the properties of carbon fiber/epoxy composites and the erosion mechanism / J. Xu [et al.] // *Journal of Wuhan University of Technology – Materials Science Edition*. 2024. Vol. 39. P. 1365–1371. Doi: 10.1007/s11595-024-3005-4.

12. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 2 (51). С. 47–58. Doi: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.

Информация об авторах

М. М. Копырин – младший научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук».

М. Г. Петров – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Сибирского научно-исследовательского института авиации имени С.А. Чаплыгина.

О. В. Старцев – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук».

М. П. Лебедев – академик РАН, доктор технических наук, профессор, генеральный директор Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук».

Information about the authors

M.M. Kopyrin - Junior Researcher, Federal Research Center "Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences".

M.G. Petrov - Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, Siberian Aeronautical Research Institute named after S.A. Chaplygin.

O.V. Startsev - Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher, Federal Research Center "Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences".

M.P. Lebedev - Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, General Director, Federal Research Center "Yakut Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences".

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 07 октября 2025; одобрена после рецензирования 24 февраля 2026; принята к публикации 16 марта 2026.

The article was received by the editorial board on 07 Oct 2025; approved after editing on 24 Feb 2026; accepted for publication on 16 Mar 2026.