



Научная статья
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)
УДК 691.175.3
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.04.041

EDN: CKXJUS

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЛАГИ НА ЭКСПОНИРОВАННЫЕ ЭПОКСИДНЫЕ СТЕКЛО-УГЛЕПЛАСТИКИ В ЗОНЕ ХОЛОДНОГО КЛИМАТА

Анна Андреевна Гаврильева¹, Анатолий Константинович Кычкян²,
Елена Дмитриевна Васильева³, Айсен Анатольевич Кычкян⁴,
Михаил Михайлович Копырин⁵, Айталь Еремеевич Марков⁶

^{1, 2, 3} Институт Физико-Технических Проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, Якутск, Россия

³ Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, г. Якутск, Россия

^{4, 5, 6} Федеральный Исследовательский Центр «ЯНЦ СО РАН», Якутск, Россия

¹ gav-ann@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5919-495X>

² kychkinplasma@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5276-5713>

³ vasilyeva_edm@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8953-9309>

⁴ icen.kychkin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1540-8140>

⁵ mkopyrin91@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6018-6391>

⁶ aital.markov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6853-6758>

Аннотация. В районах с экстремальными природно-климатическими условиями срок эксплуатации изделий из полимерных композиционных материалов в большей степени зависит от процессов старения и коррозии, чем от механического воздействия. Поскольку влага является одним из главных факторов старения, то исследование воздействия влаги на экспонированные конструкционные полимерные материалы наиболее важны для понимания процессов их старения, в том числе и на экспонированные стеклоуглепластики. Методом инфракрасной спектроскопии установлено отсутствие химического взаимодействия связующего на основе Эд-20 стекло-углепластика и влаги. Введение в эпоксидное связующее стеклоткани приводит к взаимодействию поверхностных гидроксилов стекловолокна с эпоксидными группами смолы, увеличивая количество полярных групп ($R-OH$) и исходное неравновесное состояние в стеклоуглепластиках. По этой причине после цикла сорбции и десорбции влаги, установлены необратимые изменения предела прочности на трехточечный изгиб и предела прочности на растяжение, а именно уменьшение их значений, тогда как значения предела прочности на растяжение и изгиб у углепластика остались на том же уровне. Результатом сопоставления коэффициентов диффузии при сорбции и десорбции влаги стеклоуглепластиков до и после экспонирования является обоснование релаксации исходной неравновесной структуры, возникшей при формировании, стеклоуглепластиков на начальном этапе экспонировании в зоне холодного климата. После экспонирования в течение 12 месяцев в зоне холодного климата выявлен обратимый эффект пластифицирующего воздействия влаги на предел прочности на трехточечный изгиб и на растяжение исследуемых стеклоуглепластиков. Таким образом, в летний период суточные циклы сорбции и десорбции влаги не влияют на механические свойства исследуемых стеклоуглепластиков.

Ключевые слова: стеклоткань, углектань, коэффициент диффузии, пластификация, структурная релаксация, старение, исходная неравновесная структура, предел прочности на трехточечный изгиб, предел прочности на растяжение.

Благодарности: Авторы выражают благодарность центру коллективного пользования Федерального исследовательского центра Якутского научного центра СО РАН за предоставленную возможность проведения исследований на их оборудовании.

Финансирование: Работа выполнена в рамках государственных заданий Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FWRS-2024-0036 и FWRS-2024-0058)

Для цитирования: Исследование воздействия влаги на экспонированные эпоксидные стеклоуглепластики в зоне холодного климата / А. А. Гаврильева [и др.]. // Ползуновский вестник. 2025. № 4, С. 243–249. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.04.041. EDN: <https://elibrary.ru/CKXJUS>.

Original article

EFFECTS OF MOISTURE ON CARBON FABRIC AND GLASS FABRIC REINFORCED EPOXY PLASTICS AFTER EXPOSURE TO A COLD CLIMATE ZONE

Anna A. Gavrilieva¹, Anatoly K. Kychkin², Elena D. Vasilyeva³,
Aisen A. Kychkin⁴, Michail M. Kopyrin⁵, Aital E. Markov⁶

^{1, 2, 3}V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch of the RAS, Yakutsk, Russia

³M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

^{4, 5, 6}The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the RAS, Yakutsk, Russia

¹gav-ann@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5919-495X>

²kychkinplasma@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5276-5713>

³vasilyeva_edm@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8953-9309>

⁴icen.kychkin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1540-8140>

⁵mkopyrin91@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6018-6391>

⁶aital.markov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6853-6758>

Abstract. In areas with extreme climatic conditions, the service life of polymer composite products is more dependent on ageing and corrosion processes than mechanical impact. Since moisture is one of the main factors of aging, the study of the effect of moisture on exposed structural polymeric materials is most important for understanding their aging processes, including on exposed glass fabric and carbon fabric reinforced epoxy plastics (GFRP-CFRP hybrids). Using infrared spectroscopy, it was established that there is no chemical interaction of the binder based on ED-20 with moisture. The introduction of glass fabric into the epoxy binder leads to the interaction of the surface hydroxyls of the glass fiber with the epoxy groups of the resin, increasing the number of polar groups (R-OH) and the initial nonequilibrium state in the GFRP-CFRP hybrids. For this reason, after a cycle of moisture sorption and desorption, irreversible changes in the three-point bending strength and tensile strength of the GFRP-CFRP hybrids are established: a decrease in their values, while the values of the tensile and bending strength of the CFRP remained at the same level. The result of comparing the diffusion coefficients during sorption and desorption of moisture of GFRP-CFRP hybrids before and after exposure to a cold climate zone is the justification of the relaxation of the initial nonequilibrium structure of GFRP-CFRP hybrid exposed to a cold climate zone. After exposure for 12 months in a cold climate zone, a reversible effect of the plasticizing effect of moisture on the three-point bending strength and tensile strength of the studied the GFRP-CFRP hybrids was revealed. Thus, in the summer period, the daily cycles of moisture sorption and desorption do not affect the mechanical properties of the studied the GFRP-CFRP hybrids.

Keywords: glass fabric, carbon fabric, diffusion coefficient, plasticization, structural relaxation, aging, initial nonequilibrium structure, three-point bending strength, tensile strength.

Acknowledgements: The authors express their gratitude to the shared use center of the Federal Research Center of the Yakut Scientific Center SB RAS for the opportunity to conduct research using their equipment.

Funding: The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (No. FWRS-2024-0036, No. FWRS-2024-0058).

For citation: Gavrilieva, A. A., Kychkin, A. K., Vasilyeva, E. D., Kopyrin, M. M. & Markov, A. E. (2025). Effects of moisture on carbon fabric and glass fabric reinforced epoxy plastics after exposure to a cold climate zone. *Polzunovskiy vestnik*, (4), 243-249. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.04.041. EDN: <https://elibrary.ru/CKXJUS>.

ВВЕДЕНИЕ

Добавление стекловолокна в углепластики приводит к незначительному снижению их механических, термических и физических свойств [1, 2], такие стекло-углепластики могут стать экономичной альтернативой традиционным углепластикам [4-6].

Одним из основных факторов, влияющих на полимерную матрицу в процессе использования и хранения армированных пластиков, является содержащаяся в ней влага. При поглощении влаги в армированных пластиках на основе эпоксиоединений молекулы воды экранируют полярные центры макромолекул (связанные молекулы воды), накопление свободных молекул воды вызывает перестройку полимерной матрицы и набухание материала. Это, в свою очередь, способствует релаксации напряжений, возникших в процессе формования изделий, пластификации, а также дотверждения. Кроме того, возможен гидролиз полимерной матрицы, который приводит к развитию дефектов и изменению адгезии между волокном

и полимерной матрицей. Таким образом, воздействие влагой может значительно снизить, так и повысить рабочие характеристики армированных пластиков, причем оно может быть как обратимым (пластификация), так и необратимым (релаксация структурных напряжений, сшивка) [7-11].

С другой стороны, физико-химические и структурные превращения при воздействии влаги очень важны для понимания механизмов старения пластиков при натурных климатических испытаниях [12].

Целью работы является выявление влияния сорбированной влаги на эпоксидные стекло-углепластики после экспонирования в очень холодном климате. Влияние влаги определялось по следующим критериям: отсутствие химического взаимодействия полимерной матрицы и пластификатора (влага) с помощью инфракрасной спектроскопии; наличие структурных напряжений с помощью соотнесения коэффициентов диффузии при сорбции и последующей десорбции влаги; определение обрати-

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЛАГИ НА ЭКСПОНИРОВАННЫЕ ЭПОКСИДНЫЕ СТЕКЛО-УГЛЕПЛАСТИКИ В ЗОНЕ ХОЛОДНОГО КЛИМАТА

мых и необратимых изменений механических свойств при цикле сорбции и десорбции влаги. На основе выбранных критериев стекло-углепластики сопоставляются со стеклопластиками и углепластиками до (складское хранение) и после экспонирования в холодном климате.

МЕТОДЫ

Эпоксидановая смола ЭД-20 отверждается изо-метилтетрагидрофталевым ангидридом (изоМТГФА) в присутствии ускорителя 2,4,6-три(диметиламинометил)фенола (УП-606/2) в соотношении (56,7:42,5:0,8) по рецептуре РТП-СП2-20994511-1999Т. В качестве армирующего наполнителя использовали стеклянную ткань ТР-560-30А (100) и углеродную ткань ТВИЛ 2/2-1000-12к-400. Методом вакуумной инфузии изготовлены образцы эпоксидного пластика с размерами 950×450×5 мм, имеющие слои армирования стеклоткани и/или углеткани.

Стеклопластик (СП)(GFRP) состоит из 18 слоев стеклоткани, углепластик (УП)(CFRP) состоит из 14 слоев углеткани, гибридный пластик (СП2УП2)(GF2CF2) – [СУ]₃У[СУ]₃С. Далее общее название исследуемых армированных пластиков – АП(RP).

АП согласно ГОСТ 9.708-83 выставлены на полигоне г. Якутска ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН (зона холодного климата).

Химический анализ АП исследовали методом инфракрасной спектроскопии на ИК-спектрометре с Фурье преобразованием Varian 7000 FT-IR. Спектры получали с помощью приставки НПВО.

Для исследования влагопереноса в АП, было вырезано по 5 штук плит размерами 150x75x5 мм. Торцы образцов были покрыты эпоксидной смолой. Образцы были предварительно высушены в вакуумном сушильном шкафу ШКВ-65/3,5 при температуре 60 °C до постоянной массы. Процесс сорбции влаги проводили в климатической камере М-75/150-1000 КТВХ при температуре 45 °C и относительной влажности 90 % (в течение 153 дня). Процесс десорбции влаги проводили в сушильном вакуумном термошкафу LABOR MUSZERIPARI MUVEK при температуре равной 45 °C. Взвешивание образцов проводили на аналитических весах ГОСМЕТР ВЛ-320В.

Аналогично, проводили сорбцию и десорбцию образцов АП после 1 года климатического воздействия, только были подготовлены образцы по 5 штук в виде плитки размерами 50x15x5 мм при температуре 60 °C и влажности (98±2) %.

Упруго-прочностные характеристики АП, а именно испытания на трехточечный изгиб (ГОСТ Р 56810-2015) и растяжение (ГОСТ Р 56785-2015), измерялись после цикла увлажнения образцов размерами 50x15x5 мм при температуре 60 °C и влажности (98±2) % до стабилизации массы с открытыми торцами с последующим высушиванием при температуре 60 °C в течении 72 часов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 представлены кривые ИК-спектров АП (зеленый – исходный; синий – через 240 ч. влагонасыщения; желтый – через 720 ч. влагонасыщения). У всех образцов в области 3600-3000 см⁻¹ появляется широкая более интенсивная полоса, присущие молекулы воды, которые возникают из-за изменения длины связей в молекуле [13]. Появление новых или исчезновение имеющихся спектральных пиков не наблюдается. Таким образом, сорбированная влага и

связующее на основе ЭД-20 в исследуемых стекло-(и)углепластиках химически не взаимодействуют.

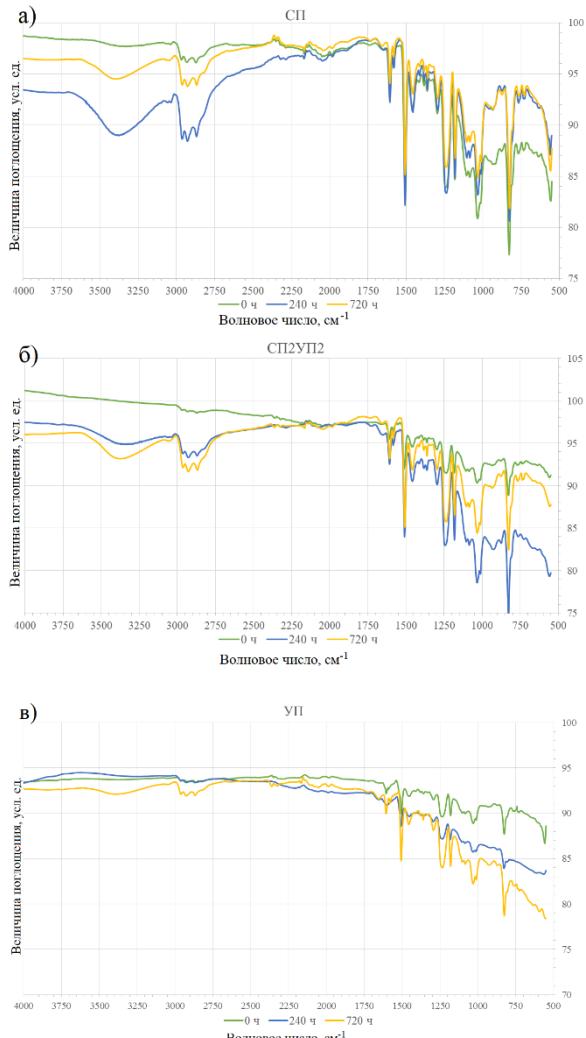
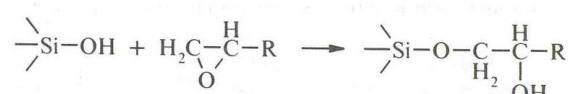


Рисунок 1 – Кривые ИК-спектров образцов пластиков (зеленый – до воздействия влаги; синий – через 240 ч. воздействия влаги; желтый – через 720 ч. воздействия влаги): а) СП; б) СП2УП2; в) УП.

Figure 1 – IR spectra curves of plastic samples (green is before exposure to moisture; blue is after 240 hours of exposure to moisture; yellow is after 720 hours of exposure to moisture): a) GFRP; b) GF2CF2; c) CFRP

После 240 ч. процесса сорбции влаги у образцов СП (рисунок 1) в спектре наблюдается увеличение интенсивности пика в области 3400 см⁻¹. Этот пик соответствует связанный молекулы воды с полярными группами полимера (R-O-H), экранируя их, вызывая пластификацию и структурирование полимерной матрицы [14]. Далее после 720 ч. наблюдается уменьшение этого пика, видимому, в результате перестройке полимерной матрицы. Известно, что в отличие от углеволокна стекловолокно обладает поверхностными гидроксилами, что приводит к дополнительным полярным группам в полимере (R-O-H) по схеме [15].



А также сильных адгезионных связей в межфазной зоне стеклоткань-связующее.

У образцов УП наблюдается рост пика в области 3400 cm^{-1} по мере влагонасыщения, что указывает на то, что степень пластификации и структурирования полимерной матрицы меньше, чем у образцов СП. Промежуточное поведение наблюдается у гибридных пластиков СП2УП2.

Экспериментальные данные влагопоглощения пластиков были обработаны в соответствии с ГОСТ 4650–2014. Кинетика определялась по относительному приросту массы, $M, \%$, в виде

$$M_n = 100 \cdot (M_{t_n} - M_0) / M_0,$$

где M_{t_n} – масса испытуемого образца после выдержки во влаге (безвлажностный режим) в течение времени $t_n, \text{ мг}, (n = 1 \dots N)$; M_0 – масса испытуемого образца после первоначального просушивания, мг.

На рисунке 2 представлены экспериментальные значения кинетики сорбции и десорбции влаги в пластиках до и после 1 года климатического воздействия. Можно выделить общие закономерности: зависимость относительного изменения массы образцов от квадратного корня из времени линейна на начальном этапе, что говорит о сорбции и десорбции влаги по закону Фика. Поэтому для аппроксимации методом наименьших квадратов используем модель диффузии Фика для бесконечной пластины с толщиной l :

– для кинетики сорбции влаги

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

где M_∞ – предельное содержание влаги; D – коэффициент диффузии влаги; t – время воздействия влагой,

– для кинетики десорбции влаги

$$\frac{M_d(t)}{M_0} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\exp(-\frac{D_d}{l^2}(2n+1)^2 \pi^2 t)}{(2n+1)^2},$$

где M_0 – начальное содержание влаги при десорбции; D_d – коэффициент диффузии десорбции влаги; t – время воздействия безвлажностного режима.

Адекватность модели определялась коэффициентом детерминации:

Таблица 1 – Параметры сорбции влаги в АП / Table 1 – Moisture sorption parameters in RPs

Маркировка	Предельное влагосодержание, %,		Коэффициент диффузии, $\times 10^2 \text{ мм}^2/\text{сут.}$		Коэффициент детерминации	
	до	после экспонирования	до	после экспонирования	до	после экспонирования
СП	0,47	1	6,8	10,3	0,990	0,986
СП2УП2	0,49	1,08	5,9	9,3	0,994	0,987
УП	0,59	1,32	7,3	16,7	0,991	0,989

Таблица 2 – Параметры десорбции влаги в АП / Table 2 – Moisture desorption parameters in RPs

Маркировка	Предельное влагосодержание, %,		Коэффициент диффузии десорбции, $\times 10^2 \text{ мм}^2/\text{сут.}$		Коэффициент детерминации	
	до	после экспонирования	до	после экспонирования	до	после экспонирования
СП	0,40	0,82	3,1	9,9	0,987	0,943
СП2УП2	0,40	0,82	3,1	9,9	0,987	0,943
УП	0,52	1,13	4,3	15,7	0,983	0,957

Модель диффузии Фика достоверно описывает кинетику сорбции и десорбции влаги АП, коэффициент детерминации $R^2 = 0,943 \dots 0,989$. Нижняя граница адекватности по шкале Чеддока равна 0,8.

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

Результаты обработки данных представлены в таблице 1 и 2.

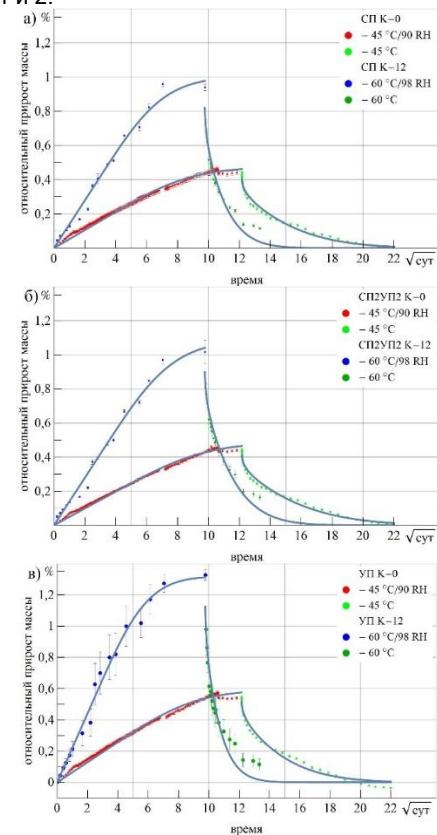


Рисунок 2 – Экспериментальные значения сорбции и десорбции влаги и ее аппроксимация законом диффузии Фика (синяя линия) в образцах до и после 1 года климатического воздействия: а) СП; б) СП2УП2; в) УП

Figure 2 – Experimental values of moisture sorption and desorption and its approximation by Fick's diffusion law (blue line) in samples before and after 1 year of climatic exposure: a) GFRP; b) GF2CF2; c) CFRP

Наибольшее значение предельного влагосодержания у образца УП, на 25 % больше, чем у образца СП. После 1 года экспонирования – на 32 %. Относительно высокая сорбционная способность

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЛАГИ НА ЭКСПОНИРОВАННЫЕ ЭПОКСИДНЫЕ СТЕКЛО-УГЛЕПЛАСТИКИ В ЗОНЕ ХОЛОДНОГО КЛИМАТА

углепластика связана с относительно высокой исходной пористостью.

Коэффициент диффузии неэкспонированных образцов УП на 6 % больше по сравнению с коэффициентом диффузии образца СП. А вот после 1 года экспонирования коэффициент диффузии образца УП на 62 % больше по сравнению с коэффициентом диффузии образца СП. Более того, у неэкспонированных образцов УП наблюдаются уменьшение массы после десорбции (рис. 2в), что, указывает на удаление низкомолекулярных продуктов десорбции.

В таблице 3 представлены значения отношения коэффициентов диффузии на стадии сорбции и десорбции влаги в АП до и после 1 года экспонирования.

Таблица 3 – Отношение коэффициентов диффузии при десорбции и сорбции влаги

Table 3 – The ratio of diffusion coefficients for moisture desorption and sorption

Маркировка	Отношение коэффициентов диффузии на стадии десорбции и сорбции влаги	
	до	после экспонирования
СП	0,45	0,93
СП2УП2	0,48	0,79
УП	0,56	0,9

Результаты, представленные в таблице 4, показывают, что коэффициент диффузии на стадии десорбции неэкспонированных образцов АП почти в 2 раза больше, чем коэффициент диффузии на стадии сорбции. На стадии сорбции происходит релаксация исходной неравновесной структуры полимерной матрицы [10, 15]. Тогда как, коэффициент диффузии на стадии десорбции почти равен коэффициенту диффузии на стадии сорбции влаги в АП после 1 года экспонирования, что указывает на то, что в полимерной матрице при экспонировании уменьшается количество активных центров и происходит релаксация полимерной матрицы, исходной неравновесной структуры.

Результаты определения необратимого воздействия влаги в АП на предел прочности при трехточечном изгибе представлены на рисунке 3, на предел прочности при растяжении представлена на рисунке 4.

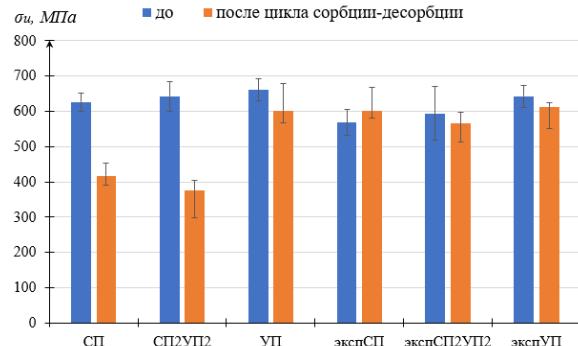


Рисунок 3 – Изменение предела прочности при изгибе образцов АП после цикла сорбции-десорбции

Figure 3 – Change in the bending strength of RPs samples after a sorption-desorption cycle

Как видно из рисунка 3 в неэкспонированных образцах СП, СП2УП2 под воздействием влаги происходит необратимые изменения предела прочности на изгиб: ухудшили свои прочностные показатели на 33 %, на 42%. Тогда как у образцов УП под воздей-

ствием влаги наблюдаются обратимые изменения механических свойств: образец УП ухудшил, но на 9%, при этом остался в пределах погрешности. Такое различие объясняется тем, что при изготовлении за счет сильных адгезионных связей в межфазном слое стеклоткань-связующее, возникает исходная неравновесная структура, она то необратимо релаксирует под воздействием влагой. Однако, через 1 год экспонирования у образцов АП наблюдается обратимый эффект под воздействием влаги на предел прочности и на изгиб.

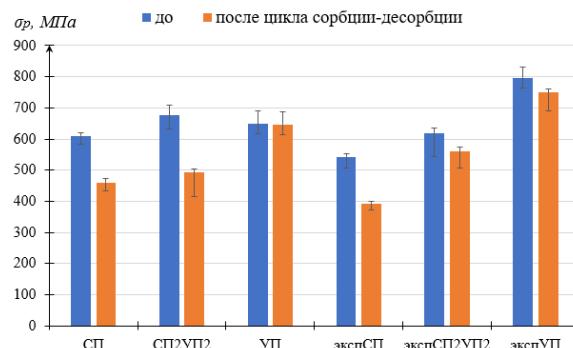


Рисунок 4 – Изменение предела прочности при растяжении после цикла сорбции-десорбции

Figure 4 – Change in the tensile strength of RPs samples after a sorption-desorption cycle

Согласно результатам (рис. 4) в неэкспонированных образцах СП, СП2УП2 под воздействием влаги происходит необратимые изменения предела прочности на растяжение: ухудшили свои прочностные показатели на растяжение на 25 %, 27 %. Тогда как у образцов УП под воздействием влаги наблюдаются обратимые изменения механических свойств: остались в пределах погрешности. Через 1 год экспонирования образцы СП, СП2УП2, УП под воздействием влаги ухудшили свои прочностные показатели на растяжение на 27 %, 10 %, 6 %. Скорее всего это связано с тем, что при измерении предела прочности на растяжение основную нагрузку воспринимают все ткани армирования, они недостаточно просушались за 72 ч. Тогда как при измерениях предела прочности на трехточечный изгиб основную нагрузку принимают межфазная зона в поверхностных слоях АП, она то успела просушится за 72 ч.

Таким образом, для определения обратимых воздействий влаги на предел прочности на растяжение необходимо время сушки увеличить вплоть до 21 суток [16].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сорбированная влага и связующее в исследуемых стекло-углепластиках химически не взаимодействуют. Введение в эпоксидное связующее стеклоткань приводит к необратимой пластификации влагой стекло-углепластика, за счет релаксации исходной неравновесной структуры. Однако после экспонирования в течение 1 года в холодном климате стекло-углепластик устойчив к воздействию цикла сорбции-десорбции в повышенной влажности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Pandya K. S., Veeraju C., Naik N. K. Hybrid composites made of carbon and glass woven fabrics under quasi-static loading // Materials & Design. 2011. Vol. 32, №1. P. 4094–4099. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.03.003.

2. Three-dimensional porosity characterization in carbon/glass fiber epoxy hybrid composites / F.M. Monticeli [et al.] // Composites: Part A. 2019. Vol. 125, №. 1. P. 105555. DOI: 10.1016/j.compositesa.2019.105555.
3. Swools Y., Gorbatikh L., Verpoest I. Fibre hybridisation in polymer composites: A review // Composites: Part A. 2014. Vol. 67, №1. P. 181–200. DOI: 2004.10.1016/j.compositesa.2014.08.027.
4. Zhang J., Chaisombat K., He S., Wang C. H. Hybrid composite laminates reinforced with glass/carbon woven fabrics for lightweight load bearing structures // Materials & Design. 2012. Vol. 36, №1. P. 75–80. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.11.006.
5. Layer-wise damage prediction in carbon/Kevlar/S-glass/E-glass fibre reinforced epoxy hybrid composites under low-velocity impact loading using advanced 3D computed tomography / A. Vasudevan [et al.]. // Int. J. Crashworthiness. 2019. Vol. 1, №1. P. 1–15. DOI: 10.1080/13588265.2018.1511234.
6. Environmental stability of GFRP laminated composites: an emphasis on mechanical behaviour / G. Mishra [et al.]. // Aircraft Engineering and Aerospace Technology. 2010. Vol. 82, №4, P. 258–266. doi:10.1108/00022661011082731.
7. Sugita Y., Winkelmann Ch., La S.V. Environmental and chemical degradation of carbon/epoxy lap joints for aerospace applications, and effects on their mechanical performance // Compos. Sci. and Technol. 2010. Vol. 70, №5. P. 829–839. doi: 10.1016/j.compscitech.2010.01.021
8. Evaluation of structural changes in epoxy systems by moisture sorption-desorption and dynamic mechanical studies / W.J. Mikols [et al.]. // Polymer Composites. 1982. Vol. 3, №3. P. 118–124. doi:10.1002/pc.750030304.
9. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. I. Механизмы старения / Е.Н. Каблов [и др.]. // Деформация и разрушение материалов. 2010. №11. С. 19–27.
10. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. II. Релаксация исходной структурной неравновесности и градиент свойств по толщине / Е.Н. Каблов [и др.]. // Деформация и разрушение материалов. 2010. №12. С. 40–46.
11. Роуленд С. Вода в полимерах. М.: Мир, 1984. 555 с.
12. Каблов Е.Н., Старцев В.О., Лаптев А.Б. Старение полимерных композиционных материалов : учебное пособие. Москва : НИЦ «Курчатовский институт», 2023. 520 с.
13. Структура и свойства воды, облученной СВЧ излучением / В.Ф. Мышкин [и др.] // Научный журнал КубГАУ. 2012. №81(07). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/struktura-i-svoystva-vody-obluchennoy-svch-izlucheniem> (дата обращения: 02.04.2025).
14. Комплексное исследование воздействия климатических и эксплуатационных факторов на новое поколение эпоксидного связующего и полимерных композиционных материалов на его основе часть 1. Исследование влияния сорбированной влаги на эпоксидную матрицу и углепластик на ее основе / Е. В. Николаев [и др.] // Труды ВИАМ. 2015. №12. С. 86–99. doi:10.18577/2307-6046-2015-0-12-11-11.
15. Startsev O.V., Krotov A.S., Mashinskaya G.P. Climatic ageing of organic fiber reinforced plastics: water effect // International Journal of Polymeric Materials. 1997. Vol. 37, №. 3–4. P. 161–171. doi: 10.1080/00914039708031483.
16. Старцев В.О. Климатическая стойкость полимерных композиционных материалов и защитных покрытий в умеренно-теплом климате: дис. д-р. техн. наук. Москва, 2018. 308 с.

Информация об авторах

А. А. Гаврильева – научный сотрудник ИФТПС им. В.П. Ларионова СО РАН.

А. К. Кычкин – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ИФТПС им. В.П. Ларионова СО РАН.

Е. Д. Васильева – ведущий инженер ИФТПС им. В.П. Ларионова СО РАН, инженер СВФУ им. М.К. Аммосова.

А. А. Кычкин – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Федерального Исследовательского Центра «ЯНЦ СО РАН».

М. М. Копырин – младший научный сотрудник Федерального Исследовательского Центра «ЯНЦ СО РАН».

А. Е. Марков – младший научный сотрудник Федерального Исследовательского Центра «ЯНЦ СО РАН».

REFERENCES

1. Pandya, K.S., Veeraju, C. & Naik, N.K. (2011). Hybrid composites made of carbon and glass woven fabrics under quasi-static loading. *Materials & Design*. (32(1)). P. 4094–4099. DOI: 10.1016/j.matdes.2011.03.003.
2. Monticeli, F. M., Ornaghi, H. L., Cornelis Voorwald, H. J., & Cioffi, M. O. H. (2019). Three-dimensional porosity characterization in carbon/glass fiber epoxy hybrid composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 125, 105555. doi:10.1016/j.compositesa.2019.105555.
3. Swools, Y., Gorbatikh, L., & Verpoest, I. (2014). Fibre hybridisation in polymer composites: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 67, 181–200. doi:10.1016/j.compositesa.2014.08.027.
4. Zhang, J., Chaisombat, K., He, S., & Wang, C. H. (2012). Hybrid composite laminates reinforced with glass/carbon woven fabrics for lightweight load bearing structures. *Materials & Design* (1980-2015), 36, 75–80. doi:10.1016/j.matdes.2011.11.006.
5. Vasudevan, A., Senthil Kumaran, S., Naresh, K., & Velmurugan, R. (2019). Layer-wise damage prediction in carbon/Kevlar/S-glass/E-glass fibre reinforced epoxy hybrid composites under low-velocity impact loading using advanced 3D computed tomography. *International Journal of Crashworthiness*, 1–15. doi:10.1080/13588265.2018.1511234.
6. Mishra, G., Mohapatra, S. R., Behera, P. R., Dash, B., Mohanty, U. K., & Ray, B. C. (2010). Environmental stability of GFRP laminated composites: an emphasis on mechanical behaviour. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 82(4), 258–266. doi:10.1108/00022661011082731.
7. Sugita, Y., Winkelmann, C., & La Saponara, V. (2010). Environmental and chemical degradation of carbon/epoxy lap joints for aerospace applications, and effects on their mechanical performance. *Composites Science and Technology*, 70(5), 829–839. doi:10.1016/j.compscitech.2010.01.021.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЛАГИ НА ЭКСПОНИРОВАННЫЕ ЭПОКСИДНЫЕ СТЕКЛО-УГЛЕПЛАСТИКИ В ЗОНЕ ХОЛОДНОГО КЛИМАТА

8. Mikols, W. J., Seferis, J. C., Apicella, A., & Nicolais, L. (1982). Evaluation of structural changes in epoxy systems by moisture sorption-desorption and dynamic mechanical studies. *Polymer Composites*, 3(3), 118–124. doi:10.1002/pc.750030304.
9. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. I. Меха-низмы старения / Е.Н. Каблов [и др.]. // Деформация и разрушение материалов. 2010. №11. С. 19-27.
10. Kablov, E.N., Startsev, O.V., Krotov, A.S., & Kirillov, V.N. (2010) Climatic aging of composite materials for aviation purposes. II. Relaxation of the initial structural nonequilibrium and the gradient of properties across the thickness. *Deformation and destruction of materials*, 12, 40-46. (In Russ.).
11. Rowland, S. (1980). *Water in polymers*. Washington, D.C.: American Chemical Society.
12. Kablov, E.N., Startsev, V.O., Laptev, A.B. (2023). Aging of polymer composite materials: a tutorial. Moscow: NRC "Kurchatov Institute".
13. Mishkin, V.F., Vlasov, V.A., Khan, V.A., & Shyan, L.N. (2012). Structure and properties of water irradiated with microwave radiation. *Scientific journal of KubSAU*. Retrieved from <https://ej.kubagro.ru/2012/07/pdf/51.pdf>. (In Russ.).
14. Nikolaev, E.V., Barbotko, S.L., Andreeva, N.P., & Pavlov M.R. (2015). Comprehensive study of the impact of climatic and operational factors on a new generation of epoxy binder and polymer composite materials based on it. Part 1. Study of the effect of sorbed moisture on the epoxy matrix and carbon fiber reinforced plastic based on it. *Proceedings of VIAM*, (12), 84-97. (In Russ.). doi:10.18577/2307-6046-2015-0-12-11-11.
15. Startsev, O., Krotov, A., & Mashinskaya, G. (1997). Climatic Ageing Of Organic Fiber Reinforced Plastics: Water Effect. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, 37(3-4), 161–171. doi:10.1080/00914039708031483.
16. Startsev, V.O. (2018). Climatic resistance of polymer composite materials and protective coatings in a moderately warm climate: Doctor's thesis. Moscow.

Information about the authors

A.A. Gavrilieva – researcher of the “V.P. Larionov institute of Physical and Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the RAS”.

A.K. Kychkin – Candidate of Technical Sciences, leading researcher of the “V.P. Larionov institute of Physical and Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the RAS”.

E.D. Vasilieva – senior engineer of the “V.P. Larionov institute of Physical and Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the RAS”, engineer of the NEFU.

A.A. Kychkin – Candidate of Technical Sciences, senior researcher of the Federal Re-search Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the RAS”.

M.M. Kopyrin – junior researcher of the Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the RAS”.

A.E. Markov – junior researcher of the Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the RAS”.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 07 июня 2025; одобрена после рецензирования 24 ноября 2025; принята к публикации 28 ноября 2025.

The article was received by the editorial board on 07 June 2025; approved after editing on 24 Nov 2025; accepted for publication on 28 Nov 2025.