

Научная статья

УДК 620.1:666.193.2

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-101-114

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТАРЕНИЯ БАЗАЛЬТОПЛАСТИКОВОЙ АРМАТУРЫ  
В УСЛОВИЯХ УМЕРЕННО ТЕПЛОГО И ОЧЕНЬ ХОЛОДНОГО КЛИМАТА  
ПОСЛЕ 10 ЛЕТ ЭКСПОЗИЦИИ НА ОТКРЫТЫХ ПЛОЩАДКАХ***П.С. Мараховский<sup>1</sup>, А.А. Кычкин<sup>2</sup>, Н.С. Скуридина<sup>1</sup>, А.К. Кычкин<sup>3</sup>, А.А. Габышев<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

<sup>2</sup>Федеральное государственное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Якутск, Россия; prezidium@prez.ysn.ru

<sup>3</sup>Федеральное государственное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск, Россия; administration@iptpn.ysn.ru

***Аннотация.** Показано влияние факторов умеренно теплого и очень холодного климата на физико-механические свойства базальтопластиковой арматуры. Температура стеклования после 10 лет экспозиции в очень холодном климате уменьшается на 1 °С, а в умеренно теплом климате – на 3–6 °С в сравнении с исходным состоянием. Экстремальные климатические условия оказывают более агрессивное воздействие на композиционную арматуру с увеличением диаметра от 6 до 8 мм, чем условия Геленджика, в силу возрастания упругих напряжений в объеме материала. Наблюдается значительное снижение прочности при растяжении (на 15,4 %) и сжатии (на 14,9 %) в условиях Якутска после экспозиции на открытой площадке в течение 10 лет.*

***Ключевые слова:** старение, температурный коэффициент линейного расширения, температура стеклования, базальтопластиковая арматура, прочность при растяжении*

***Для цитирования:** Мараховский П.С., Кычкин А.А., Скуридина Н.С., Кычкин А.К., Габышев А.А. Исследование старения базальтопластиковой арматуры в условиях умеренно теплого и очень холодного климата после 10 лет экспозиции на открытых площадках // Труды ВИАМ. 2025. № 12 (154). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-101-114.*

Scientific article

**BASALT-PLASTIC ROD AGING INVESTIGATION  
IN MODERATELY WARM AND VERY COLD CLIMATES  
AFTER 10 YEARS OF EXPOSURE IN OPEN AREAS***P.S. Marakhovskiy<sup>1</sup>, A.A. Kychkin<sup>2</sup>, N.S. Skuridina<sup>1</sup>, A.K. Kychkin<sup>3</sup>, A.A. Gabyshev<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

<sup>2</sup>Federal State Budgetary Institution of Science Federal Research Center «The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science», Yakutsk, Russia; prezidium@prez.ysn.ru

<sup>3</sup>Federal State Budgetary Institution of Science Federal Research Center «The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science» V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia; administration@iptpn.ysn.ru

**Abstract.** The article shows the influence of the factors of a moderately warm and very cold climates on the physical and mechanical properties of the material. The glass transition temperature decreases by 1 °C after 10 years of exposure in a very cold climate, and decreases by 3–6 °C in a moderately warm climate, compared to the initial state. Extreme climatic conditions have a more aggressive effect on composite reinforcement with an increase in diameter from 6 to 8 mm than in Gelendzhik, due to an increase in elastic stresses in the volume of the material. There is a significant decrease in the strength of  $\sigma_t$  by 15,4 %,  $\sigma_c$  by 14,9 % in Yakutsk conditions after exposure in an open area for 10 years.

**Keywords:** aging, temperature coefficient of linear expansion, glass transition temperature, basalt reinforcement, tensile strength

**For citation:** Marakhovskiy P.S., Kychkin A.A., Skuridina N.S., Kychkin A.K., Gabyshev A.A. Basalt-plastic rod aging investigation in moderately warm and very cold climates after 10 years of exposure in open areas. *Trudy VIAM*, 2025, no. 12 (154), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-12-101-114.

### Введение

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) подвержены старению при эксплуатации в различных климатических зонах. Конструкции из ПКМ нашли применение в авиационной промышленности, строительстве, машиностроении, но для обеспечения безопасной эксплуатации необходимо выработать требования к их надежности [1, 2].

Важным показателем надежности является сохраняемость свойств материала. Поскольку ПКМ применяют в различных отраслях, необходимо учитывать изменение характеристик в различных климатических районах. Для большей части РФ выделяют холодные и умеренные макроклиматические районы [3].

Ухудшение механических показателей ПКМ после экспозиции на открытых стендах в умеренно холодном, холодном и очень холодном климате соизмеримо или даже более значительно, чем после пребывания в теплых и влажных регионах. Наибольшее воздействие на ПКМ оказывают внешние факторы в очень холодном климате (Якутск) в сравнении с умеренно теплым климатом (Геленджик). Снижение прочности после 5 лет экспозиции угле-, стекло- и органопластиков на 10–15 % больше, чем после аналогичного экспонирования в более теплых регионах (Москва, Геленджик, Сочи, Батуми) в силу достижения экстремально низких температур [4]. Такое изменение связано с воздействием воды, проникающей в объем матрицы из воздушной среды и замерзающей в условиях ограниченного объема внутри полимерной цепи при температурах ниже –30 °C. При размере капли 150 нм она замерзает при –10 °C, 20 нм – при –20 °C, 5 нм – при –36 °C, 2 нм – при –41 °C [5, 6]. Основным типом надмолекулярной структуры аморфных полимеров являются глобулярные образования, типичные как для линейных, так и для сшитых полимеров. Размер структурной составляющей варьируется от 10 до 100 нм. Таким образом, для полимеров, представляющих собой одну макромолекулу, нижняя точка замерзания воды будет составлять приблизительно –22 °C [7]. В Якутске переходы через температуру –22 °C происходят ~(10–12) раз в год. При образовании льда макромолекула увеличивается в объеме, что способствует зарождению дополнительных напряжений, приводящих к растрескиванию матрицы в глубине изделия [8].

Для других регионов РФ такие низкие температуры не характерны, возможны частые переходы через температуру 0 °C. В случае зарождения на поверхности микротрещин проникающая вглубь вода воздействует на верхний слой материала [9]. Дефекты могут возникать за счет влияния ультрафиолета и механического воздействия. Частицы пыли и песка оказывают истирающее действие на поверхность ПКМ: происходит потеря блеска, механическое вымеливание пигментов и эрозия покрытия [10, 11].

На начальной стадии экспозиции на открытых площадках в материале происходят процессы доотверждения и структурной релаксации за счет перегрева вследствие солнечного излучения. За счет интегральной степени черноты, близкой к 1, практически

вся энергия излучения Солнца, поглощаемая углепластиком, расходуется на увеличение температуры образца. В дни высокой солнечной радиации его температура может превышать температуру окружающего воздуха на 20–40 °С [12, 13]. Повышение температуры образца ускоряет протекание физико-химических процессов как старения (фото- и термоокислительной деструкции), так и структурообразования.

В настоящее время в связи с активным освоением арктических регионов повышенное внимание исследователей привлечено к проблеме старения ПКМ в холодном климате.

Цель работы – установление зависимости изменения физико-механических свойств базальтопластиковой арматуры (БПА) при экспозиции в течение 5 и 10 лет на открытых площадках в условиях умеренно теплого и очень холодного климата.

### Материалы и методы

Для проведения исследований отобраны образцы из промышленной партии БПА, представляющие собой однонаправленные стержни с кольцевым армированием диаметрами 6, 8 и 10 мм, изготовленные на технологической линии Бийского завода стеклопластиков на основе базальтового ровинга РБН 13-2400-4С производства ООО «ТБМ» (Якутск) согласно ТУ 2296-001-86166796–2013. Линия предназначена для изготовления арматурного стержня волнового периодического профиля методом продольно-поперечной намотки из однонаправленных волокнистых материалов, пропитанных полимерным связующим на основе термореактивных эпоксидно-диановых смол. Исходное связующее, основу которого составляет эпоксидно-диановая смола ЭД-22, отверждаемая изометилтетрагидрофталевым ангидридом (изо-МТГФА) в присутствии ускорителя 2,4,6-трис(диметиламинометил)фенола (УП-606/2), готовили по рецептуре, согласно РТП-КП-2296-001-86166796–2012, и формовали по режиму с максимальной температурой отверждения 150 °С [14–22].

Для испытания методом динамического механического анализа образцов БПА диаметрами 6, 8 и 10 мм в исходном состоянии и после экспозиции на открытых площадках применен держатель для трехточечного изгиба с расстоянием между опорами 40 мм и шириной индентора 12 мм. Испытания проведены в среде аргона (расход газа 43 мл/мин) в диапазоне температур от 25 до 250 °С, со скоростью нагрева 5 °С/мин, с частотой 1 Гц и амплитудой деформации 10 мкм. Для исключения влияния измененного приповерхностного слоя на физические свойства вырезаны образцы из центра БПА размером 4×5×45 мм.

Для анализа температурного коэффициента линейного расширения  $\alpha$  использованы образцы размером 4×4×20 мм. Измерения проведены в среде гелия (расход газа 70 мл/мин), проходящего через измерительную ячейку термомеханического анализатора, скорость нагрева составила 5 °С/мин.

Прочность при растяжении определяли на испытательной машине на базе ЦКП ИФТПС СО РАН. Скорость перемещения траверсы составила 5 мм/мин. Согласно ГОСТ 32492–2015, для определения прочностных характеристик использовали образцы общей длиной 625±2 мм из-за ограничений величины захвата испытательной машины. Длина рабочего участка составила 320±2 мм, длина испытательной муфты: 150±2 мм с каждой стороны. Методика испытаний допускает использование более коротких испытательных муфт, если разрыв образца происходит в пределах длины рабочего участка без проскальзывания и разрушения в них. Длина базы измерения, по центру которой размещен экстензометр, составила 50±2 мм. Для определения прочности при сжатии, согласно ГОСТ 32492–2015, применены образцы длиной 176±2 мм.

Работа выполнена в рамках государственных заданий Министерства науки и высшего образования Российской Федерации FWRS-2024-0036 и FWRS-2024-0058 с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ и ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

### Результаты и обсуждение

На рис. 1–3 представлены фотографии БПА в исходном состоянии, после 5 и 10 лет экспозиции в условиях открытых площадок климатических станций в Якутске и Геленджике.

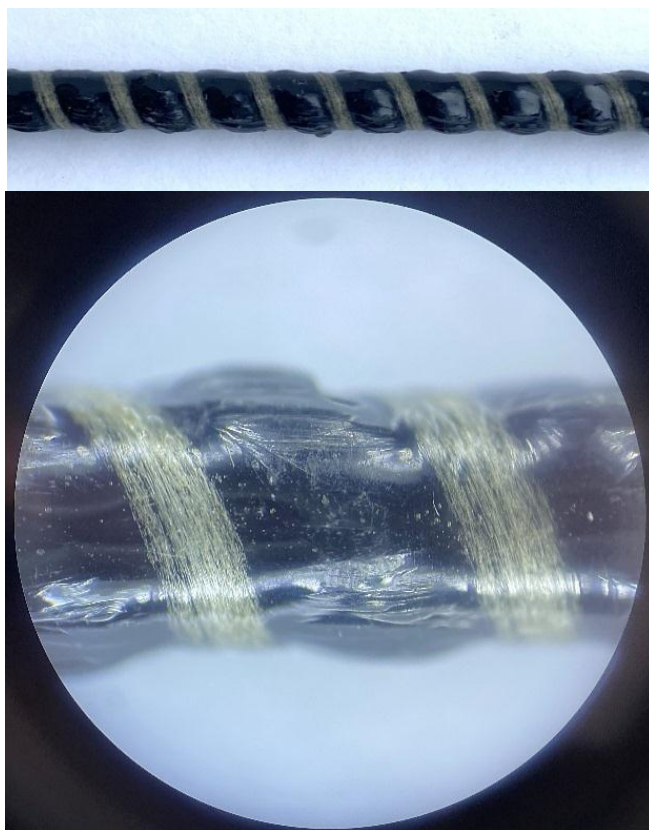


Рис. 1. Образец базальтопластиковой арматуры диаметром 6 мм в исходном состоянии

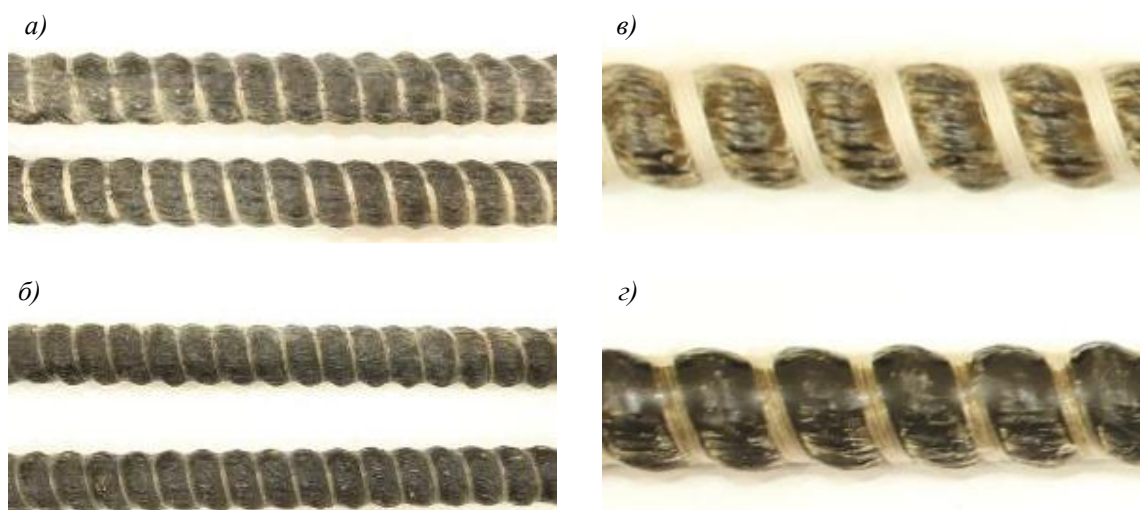


Рис. 2. Образцы базальтопластиковой арматуры диаметром 10 мм после 5 лет экспозиции на открытой площадке в Якутске (а, б) и Геленджике (в, г) с солнечной (а, в) и теневой (б, г) сторон

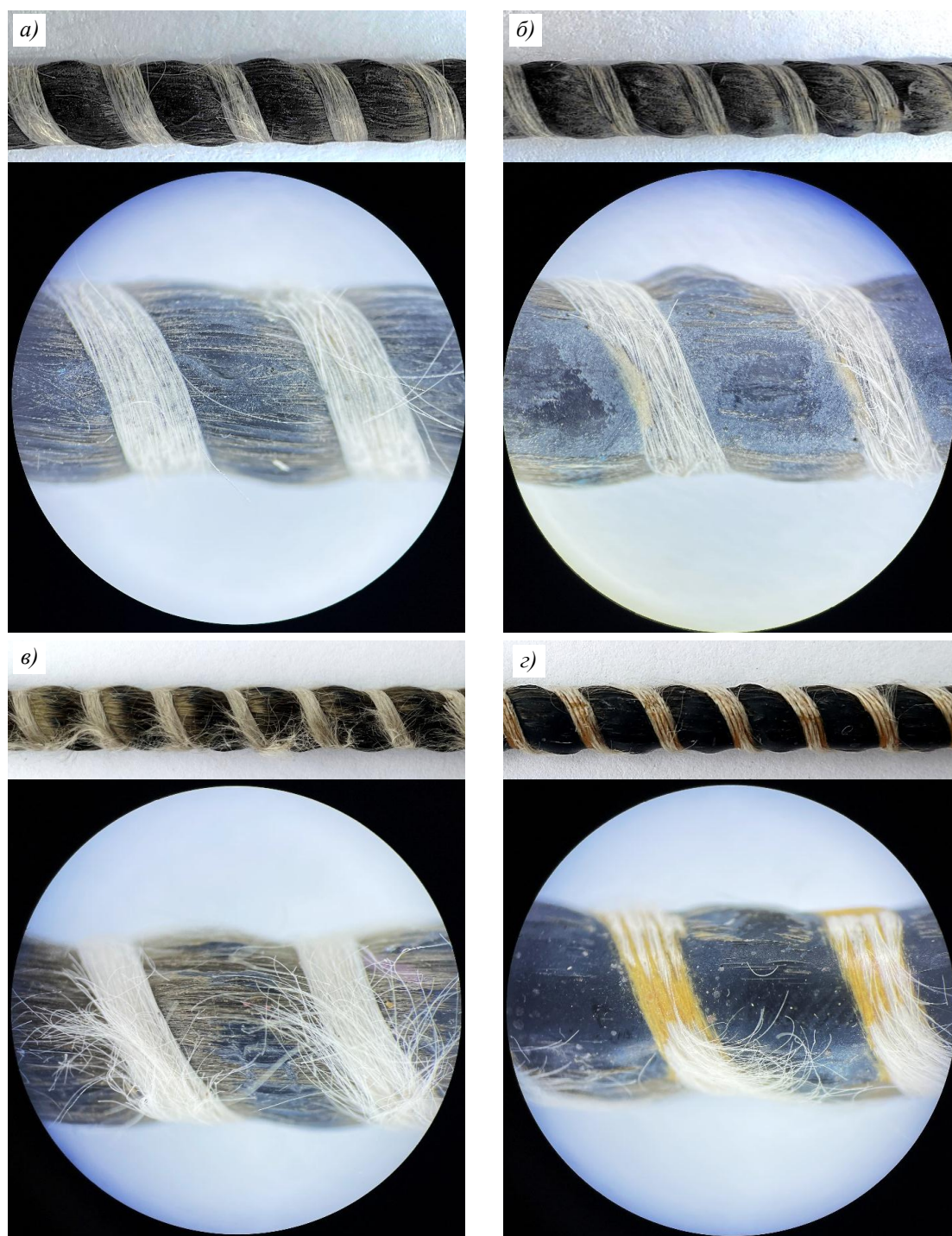


Рис. 3. Образцы базальтопластиковой арматуры диаметром 6 мм после 10 лет экспозиции на открытой площадке в Якутске (а, б) и Геленджике (в, г) с солнечной (а, в) и теневой (б, г) сторон

При визуальном осмотре у образцов БПА после 5 лет экспозиции на открытой площадке в Геленджике с солнечной стороны обнаружены потеря блеска, осветление, обрывы светлой оплеточной нити (рис. 2, г) и полное оголение волокон, с теневой стороны – осветление и частичное оголение волокон. Аналогичные изменения характерны и для образцов, размещенных на климатической станции в Якутске. После 10 лет экспозиции в Якутске на образцах с солнечной стороны наблюдаются осветление, износ

поверхности, потеря блеска и полимерной матрицы, что приводит к оголению армирующего наполнителя. С теневой стороны процесс деградации происходит медленнее, но также зафиксированы осветление и частичное оголение волокон, что свидетельствует о влиянии не только ультрафиолетового излучения, но и других факторов. Присутствуют также остатки полимерной матрицы на обмоточной нити (рис. 3, б), что подтверждает неравномерную деградацию с теневой стороны. На образцах обнаружены участки, менее подверженные ультрафиолетовому излучению, ветровой или дождевой эрозии с наиболее защищенной стороны из-за особенностей формы образца арматуры. На образцах после 10 лет экспонирования на открытой площадке в Геленджике с солнечной стороны также наблюдаются осветление, износ поверхности, потеря блеска и полимерной матрицы, что приводит к оголению армирующего волокна. С теневой стороны зафиксированы сохранение полимерной поверхности арматуры и значительное усыхание на обмоточной нити материала. Распушивание обмоточной нити связано с воздействием высокой влажности, что приводит к набуханию полимерной матрицы в зимне-весенний период и последующей десорбции в летний сезон (рис. 3, в).

Чувствительными методами термического анализа [15] исследованы температурный коэффициент линейного расширения и температура стеклования  $T_g$  БПА в исходном состоянии, после 5 и 10 лет климатического старения на открытых стендах в умеренно теплом климате Геленджика и очень холодном климате Якутска.

Методом динамического механического анализа для БПА в исходном состоянии выявлен двойной переход из стеклообразного в высокоэластическое состояние:  $\alpha_1$ -переход при 140 °С и  $\alpha_2$ -переход при 170 °С. После климатического воздействия в течение 5 лет в Якутске обнаружено смещение  $\alpha_1$ -перехода к низким температурам, а  $\alpha_2$ -перехода – к более высоким. Причинами изменения температур переходов являются ослабление внутримолекулярного взаимодействия и доотверждение эпоксидной матрицы, сопровождающееся повышением температуры стеклования на 2–4 °С, увеличением соотношения  $E'_{175}/E'_{25}$  и уменьшением доли свободного объема на 4 %. Соотношение доли физико-химических и химических сшивок можно определить по формуле

$$\frac{v_{\text{фх}}}{v_x} = \frac{E'_{25}}{E'_{175}} - 1,$$

где  $E'_{25}$  и  $E'_{175}$  – динамический модуль упругости в высокоэластическом и стеклообразном состояниях;  $v_{\text{фх}}/v_x$  – соотношение количества узлов физико-химических и химических сшивок [23, 24].

Результаты испытаний образцов, размещенных на различных климатических площадках, приведены в табл. 1 и на рис. 4–8.

На начальном этапе экспозиции в образцах накоплены значительные напряжения, о чем свидетельствует соотношение минимального и максимального значений динамического модуля упругости при 30 °С, составляющее 1,2. После 5 лет размещения в Якутске накопление напряжений приводит к увеличению данного показателя до 1,9, а в Геленджике релаксация напряжений служит причиной снижения соотношения до 1,1. Увеличение продолжительности экспозиции в 2 раза характеризуется снижением данного соотношения как в Геленджике (до 1,08), так и в Якутске (до 1,47). Максимальные значения динамического модуля упругости образцов БПА достигаются после 5 лет экспонирования в Геленджике и после 10 лет в Якутске. При этом температура стеклования после 10 лет экспозиции в условиях очень холодного климата снижается на 1 °С, а в умеренно теплом климате – на 3–6 °С в сравнении со значениями для образцов в исходном состоянии.

Таблица 1

Результаты испытаний образцов базальтопластиковой арматуры диаметрами 6, 8 и 10 мм в исходном состоянии, после 5 и 10 лет экспозиции в Якутске и Геленджике

Показатель	Значение показателя для образца диаметром, мм					
	6	8	10	6	8	10
	Якутск			Геленджик		
Исходное состояние						
Экстраполированное значение начала перехода на кривой динамического модуля упругости $E'$ , °С	127	130	130	127	130	130
Точка перегиба на кривой динамического модуля упругости $E'$ , °С	138	140	142	138	140	142
Экстраполированное окончание перехода на кривой динамического модуля упругости $E'$ , °С	198	182	181	198	182	181
Пик на кривой тангенса угла механических потерь $\text{tg}\delta$ , °С	143	144	147	143	144	147
Пик на кривой модуля потерь $E''$ , °С	142	137	142	142	137	142
$E'_{175}/E'_{25}$	0,56	0,32	0,24	0,56	0,32	0,24
$\alpha_{175}$	12,7	13,5	13,2	12,7	13,5	13,2
$\alpha_{50}$	11,6	12,2	12,4	11,6	12,2	12,4
$\nu_{\text{фх}}/\nu_{\text{х}}$	0,78	2,16	3,10	0,78	2,16	3,10
5 лет экспозиции						
Экстраполированное значение начала перехода на кривой динамического модуля упругости $E'$ , °С	127	128	128	122	128	121
Точка перегиба на кривой динамического модуля упругости $E'$ , °С	142	141	140	143	143	136
Экстраполированное окончание перехода на кривой динамического модуля упругости $E'$ , °С	182	175	180	197	187	185
Пик на кривой тангенса угла механических потерь $\text{tg}\delta$ , °С	149	149	147	147	146	141
Пик на кривой модуля потерь $E''$ , °С	139	139	138	143	142	136
$E'_{175}/E'_{25}$	0,51	0,32	0,29	0,53	0,35	0,28
$\alpha_{175}$	7,20	7,57	6,73	5,55	7,05	7,35
$\alpha_{50}$	6,35	7,02	6,42	6,25	6,86	6,82
$\nu_{\text{фх}}/\nu_{\text{х}}$	0,98	2,10	2,46	0,89	1,84	2,64
10 лет экспозиции						
Экстраполированное значение начала перехода на кривой динамического модуля упругости $E'$ , °С	125	125	126	120	119	126
Точка перегиба на кривой динамического модуля упругости $E'$ , °С	137	139	141	135	134	137
Экстраполированное окончание перехода на кривой динамического модуля упругости $E'$ , °С	193	189	198	186	180	181
Пик на кривой тангенса угла механических потерь $\text{tg}\delta$ , °С	139	141	143	138	138	140
Пик на кривой модуля потерь $E''$ , °С	136	138	140	133	134	130
$E'_{175}/E'_{25}$	0,62	0,40	0,42	0,22	0,17	0,20
$\alpha_{175}$	6,12	6,79	7,20	7,41	6,70	6,44
$\alpha_{50}$	6,22	6,58	6,81	6,64	6,88	7,14
$\nu_{\text{фх}}/\nu_{\text{х}}$	0,61	1,49	1,39	3,63	4,92	4,21
Примечание. $E'_{175}/E'_{25}$ – соотношение динамических модулей упругости в высокоэластическом и стеклообразном состояниях, $\alpha_{175}$ и $\alpha_{50}$ – температурные коэффициенты линейного расширения при температурах 175 и 50 °С соответственно, $\nu_{\text{фх}}/\nu_{\text{х}}$ – соотношение количества узлов физико-химических и химических сшивок.						

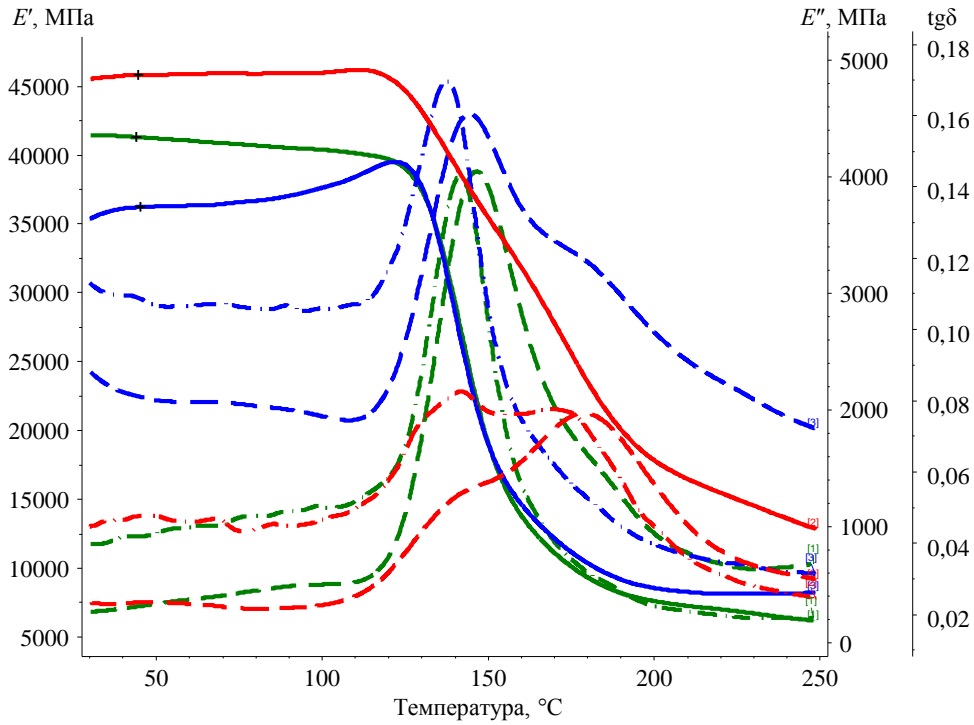


Рис. 4. Температурные зависимости динамического модуля упругости  $E'$  (—), модуля потерь  $E''$  (-·-) и тангенса угла механических потерь  $\text{tg}\delta$  (- -) образцов базальтопластиковой арматуры диаметрами 6 (—), 8 (—) и 10 мм (—) в исходном состоянии

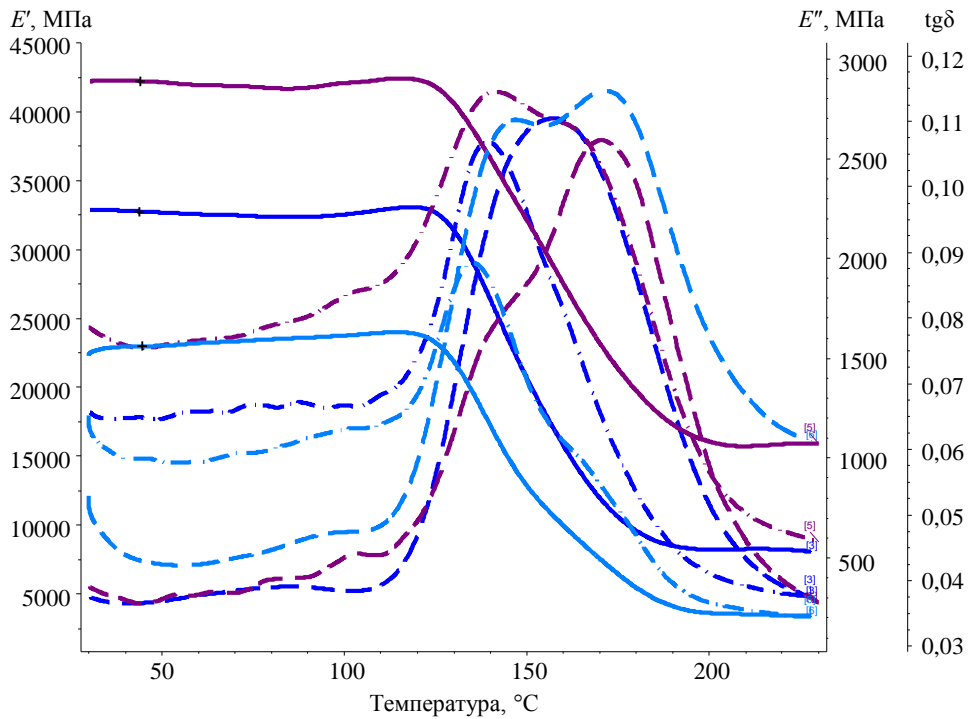


Рис. 5. Температурные зависимости динамического модуля упругости  $E'$  (—), модуля потерь  $E''$  (-·-) и тангенса угла механических потерь  $\text{tg}\delta$  (- -) образцов базальтопластиковой арматуры диаметрами 6 (—), 8 (—) и 10 мм (—) после 5 лет экспозиции в Якутске

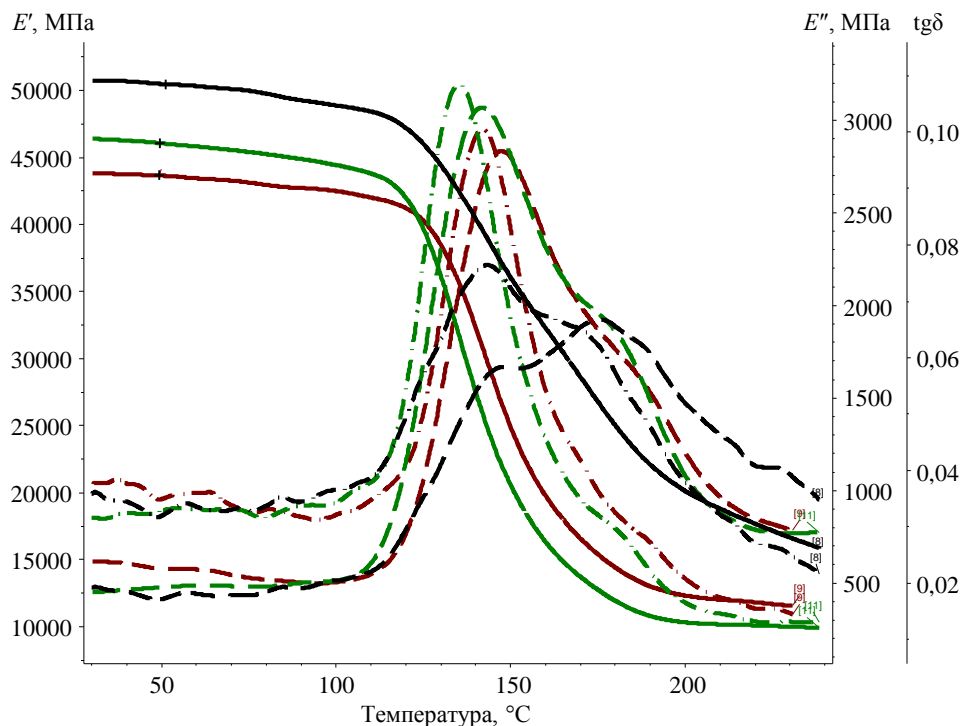


Рис. 6. Температурные зависимости динамического модуля упругости  $E'$  (—), модуля потерь  $E''$  (- · -) и тангенса угла механических потерь  $\text{tg}\delta$  (- -) образцов базальтопластиковой арматуры диаметрами 6 (—), 8 (—) и 10 мм (—) после 5 лет экспозиции в Геленджике

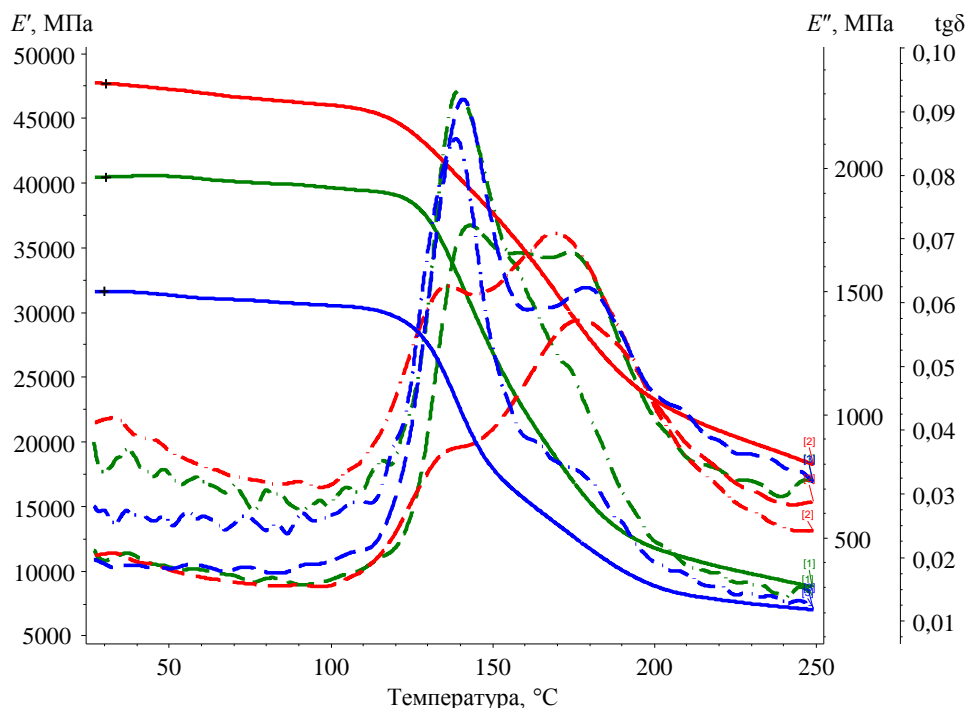


Рис. 7. Температурные зависимости динамического модуля упругости  $E'$  (—), модуля потерь  $E''$  (- · -) и тангенса угла механических потерь  $\text{tg}\delta$  (- -) образцов базальтопластиковой арматуры диаметрами 6 (—), 8 (—) и 10 мм (—) после 10 лет экспозиции в Якутске

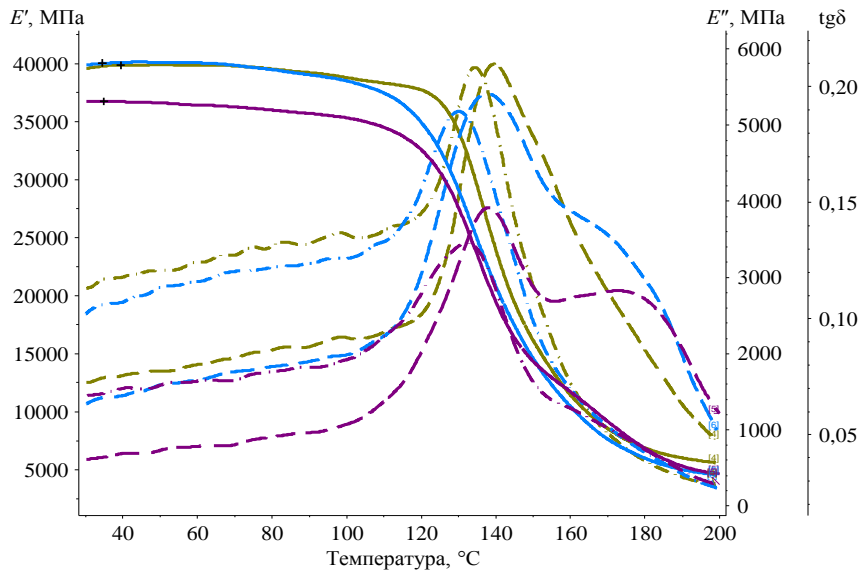


Рис. 8. Температурные зависимости динамического модуля упругости  $E'$  (—), модуля потерь  $E''$  (-·-) и тангенса угла механических потерь  $\text{tg}\delta$  (---) образцов базальтопластиковой арматуры диаметрами 6 (—), 8 (—) и 10 мм (—) после 10 лет экспозиции в Геленджике

Соотношение количества физических и химических узлов определяет условие распределения внешней нагрузки в БПА. Если доля физических узлов большая, то обеспечивается равномерное распределение нагрузки. Наибольшей пластичностью обладает арматура диаметром 10 мм, однако с увеличением продолжительности экспозиции в условиях очень холодного климата доля химических сшивок повышается, что снижает подвижность узлов в полимере. Наименьшей способностью к деформации обладает реактопласт в арматуре диаметром 6 мм. Следует отметить снижение доли поперечных сшивок для всех изделий различных типоразмеров, размещенных в Геленджике, так как соотношение  $E'_{175} / E'_{25}$  уменьшается до 60 %, что свидетельствует о деградации материала. Данный показатель в Якутске возрастает до 75 %, что свидетельствует об увеличении плотности химических связей.

В табл. 2 и 3 представлены результаты сравнительных исследований прочностных свойств БПА диаметрами 6 и 8 мм в умеренно теплом и очень холодном климате.

Таблица 2

**Влияние экспонирования в умеренно теплом и очень холодном климате на прочностные показатели базальтопластиковой арматуры диаметром 6 мм [25, 26]**

Место экспонирования	Продолжительность экспонирования, мес.	Показатель	Значение показателя, МПа	Изменение показателя, %
В исходном состоянии	—	$\sigma_t$	1120	—
		$\sigma_b$	1023	
		$\sigma_c$	410	
Геленджик	30	$\sigma_b$	1094	+6,9
		$\sigma_c$	427	+4,2
Якутск	28	$\sigma_t$	1206	+7,7
		$\sigma_b$	1215	+18,8
		$\sigma_c$	428	+4,3
Геленджик	54	$\sigma_b$	1193	+16,6
Якутск	51	$\sigma_t$	1275	+13,8
		$\sigma_b$	1220	+19,3
Геленджик	120	$\sigma_t$	1036	-7,4
		$\sigma_c$	440	+7,3
Якутск	120	$\sigma_t$	1040	-7,1
		$\sigma_c$	416	+1,5

Примечание.  $\sigma_t$ ,  $\sigma_c$ ,  $\sigma_b$  – пределы прочности при растяжении, сжатии и изгибе.

Таблица 3

**Влияние экспонирования в умеренно теплом и очень холодном климате на прочностные показатели базальтопластиковой арматуры диаметром 8 мм [25, 26]**

Место экспонирования	Продолжительность экспонирования, мес.	Показатель	Значение показателя, МПа	Изменение показателя, %
В исходном состоянии	–	$\sigma_t$	1003	–
		$\sigma_c$	466	
Геленджик	54	$\sigma_t$	1029	+2,6
Якутск	51	$\sigma_t$	1081	+7,7
		$\sigma_c$	485	+4,1
Геленджик	120	$\sigma_t$	933	–7,0
		$\sigma_c$	423	–9,3
Якутск	120	$\sigma_t$	849	–15,4
		$\sigma_c$	397	–14,9

Примечание.  $\sigma_t$ ,  $\sigma_c$  – пределы прочности при растяжении и сжатии.

Экстремальные климатические условия (низкие температуры, высокая влажность, циклы «замораживание–оттаивание») в течение 10 лет экспозиции оказывают более агрессивное воздействие на композиционную арматуру с увеличением ее диаметра, чем условия умеренно теплого климата, в силу возрастания упругих напряжений в объеме материала [27]. Наблюдается значительное снижение пределов прочности при растяжении (на 15,4 %) и сжатии (на 14,9 %) на открытой площадке в условиях Якутска.

С увеличением толщины изделия возникают большие градиенты температур при одних и тех же условиях окружающей среды, в связи с чем в БПА возникают микротрещины из-за циклических температурных нагрузок и повышенной концентрации напряжений в материале, что способствует его деградации.

### Заключения

Показано влияние факторов умеренно теплого и очень холодного климата на физико-механические свойства материала. Температура стеклования после 10 лет экспозиции в Якутске уменьшается на 1 °С, а в Геленджике – на 3–6 °С в сравнении с исходным состоянием. При этом плотность сшивок увеличивается до 75 % для образцов, размещенных в условиях очень холодного климата, и снижается до 60 % для образцов, экспонированных в умеренно теплом климате, за один и тот же период. Прочностные показатели БПА диаметром 8 мм уменьшаются на 15,4 %, а для изделия диаметром 6 мм – на 7,1 %.

### Список источников

1. Садыхов Г.С., Савченко В.П., Елисеева О.В. Основы оценок остаточного ресурса изделий // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Естественные науки. 2011. № S3. С. 83–99.
2. ГОСТ Р 27.102–2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. М.: РСТ, 2021. 35 с.
3. ГОСТ 25870–83. Макроклиматические районы земного шара с холодным и умеренным климатом. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей. М.: Изд-во стандартов, 1984. 176 с.
4. Старцев О.В., Лебедев М.П., Кычкин А.К. Старение полимерных композиционных материалов в условиях экстремально холодного климата // Известия Алтайского государственного университета. 2020. № 1 (11). С. 41–51. DOI: 10.14258/izvasu(2020)1-06.
5. Мараховский П.С., Баринов Д.Я., Мальцева Е.Ю. Влияние армирующих добавок на структуру и теплофизические свойства ледяных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2023. № 4 (73). Ст. 11. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 25.12.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-111-121.
6. Hakimian A., Mohebinia M., Nazari M. et al. Freezing of few nanometers water droplets // Nature Communications. 2021. Vol. 12. No. 1. P. 1–8. DOI: 10.1038/s41467-021-27346-w.

7. Матвеева Л.Ю., Ястребинская А.В. Взаимосвязь надмолекулярной структуры и свойств полимерных композиционных материалов на основе термореактивных связующих // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 12. С. 49–54. DOI: 10.12737/article\_5a27cba0904cd3.84567882.
8. Скачков Ю.Б. Динамика многолетних изменений экстремумов температуры воздуха в г. Якутске // Целостность и ресурс в экстремальных условиях. 2024. № 1. С. 185–187. DOI: 10.24412/c1-37269-2024-1-185-187.
9. Каблов Е.Н., Лаптев А.Б., Прокопенко А.Н., Гуляев А.И. Релаксация полимерных композиционных материалов под длительным действием статической нагрузки и климата (обзор). Часть 1. Связующие // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4 (65). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.01.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
10. Старцев В.О., Валева Е.О., Гуляев А.И. Влияние старения поверхности полимерных композиционных материалов на их механические свойства // Труды ВИАМ. 2020. № 8 (90). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.01.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-64-76.
11. Иванов М.С., Морозова В.С., Павлюкович Н.Г. Влияние эксплуатационных факторов на свойства углепластика на основе полиэфирэфиркетона // Авиационные материалы и технологии. 2024. № 2 (75). Ст. 08. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.01.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-99-108.
12. Старцев В.О., Куцевич К.Е., Хрулев К.А., Молоков М.В. Прогнозирование температуры поверхности образцов композиционных материалов на основе клеевых препрегов при экспонировании в климатических условиях // Клеи. Герметики. Технологии. 2017. № 9. С. 24–31.
13. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Измерение и прогнозирование температуры образцов материалов при экспонировании в различных климатических зонах // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 4 (61). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-47-58.
14. Ammar M.A. Bond Durability of Basalt Fibre-Reinforced Polymers (BFRP) bars under freeze-and-thaw conditions: Thesis. Quebec, 2014. 105 p.
15. Parnas R., Shaw M., Liu Q. Basalt Fiber Reinforced Polymer Composites: Technical Report NETCR63. Institute of Materials Science, University of Connecticut, 2007. 133 p.
16. Alaimo G., Valenza A., Enea D., Fiore V. The durability of basalt fibres reinforced polymer (BFRP) panels for cladding // Materials and Structures. 2016. Vol. 49. No. 6. P. 2053–2064. DOI: 10.1617/s11527-015-0633-3.
17. Wu G., Wang X., Wu Z. et al. Durability of basalt fibers and composites in corrosive environments // Journal of Composite Materials. 2015. Vol. 49. No. 7. P. 873–887. DOI: 10.1177/0021998314526628.
18. Liu Q., Shaw M.T., Parnas R.S., McDonnell A.-M. Investigation of Basalt Fiber Composite Mechanical Properties for Applications in Transportation // Polymer Composites. 2006. Vol. 27. P. 41–48. DOI: 10.1002/pc.20162.
19. Dhand V., Mittal G., Rhee K.Y. et al. A short review on basalt fiber reinforced polymer composites // Composites. Part B: Engineering. 2015. Vol. 73. No. 5. P. 166–180. DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.12.011.
20. Chikhradze N.M., Japaridze L.A., Abashidze G.S. Properties of basalt plastics and of composites reinforced by hybrid fibers in operating conditions // Composites and their applications. Intech Open, 2012. P. 243–268. DOI: 10.5772/48289.
21. Matykiewicz D., Lewandowski K., Dudziec B. Evaluation of thermomechanical properties of epoxy–basalt fibre composites modified with zeolite and silsesquioxane // Composite Interfaces. 2017. Vol. 24. No. 5. P. 489–498.
22. ACI 440.3R-04. Guide test methods for fiber-reinforced polymers (FRPs) for reinforcing or strengthening concrete structures. Farmington Hills: The American Concrete Institute, 2004. 40 p.
23. Акатенков Р.В., Алексахин В.М., Аношкин И.В., Бабин А.Н., Богатов В.А., Грачев В.П., Кондрашов С.В., Минаков В.Т., Раков Э.Г. Критерий эффективности использования функционализированных углеродных нанотрубок для улучшения физико-механических свойств эпоксидных смол // Авиационные материалы и технологии. 2010. № 3 (16). С. 22–27.
24. Королев Г.В., Могилев М.М., Голиков И.В. Сетчатые полиакрилаты. Микрогетерогенные структуры, физические сетки, деформационно-прочностные свойства. М.: Химия, 1995. 275 с.

25. Кычкин А.К., Попов В.В., Кычкин А.А. Исследование влияния экстремально холодного климата на свойства базальтопластиковых стержней // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2020. Т. 22. № 2 (94). С. 25–31. DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-2-25-31.
26. Кычкин А.К., Попов В.В., Кычкин А.А. Климатическая стойкость базальтокомпозитных арматур // Наука и образование. 2017. № 1 (85). С. 71–74.
27. Каблов Е.Н., Лебедев М.П., Старцев О.В., Голиков Н.И. Климатические испытания материалов, элементов конструкций, техники и оборудования в условиях экстремально низких температур // Тр. VI Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата EURASTRENCOLD–2013 (24–29 июня 2013 г., г. Якутск). Якутск, 2013. С. 5–7.

#### References

1. Sadykhov G.S., Savchenko V.P., Eliseeva O.V. Basics of Estimating the Residual Life of Products. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman. Ser.: Natural Sciences*, 2011, no. S3, pp. 83–99.
2. State Standard R 27.102–2021. *Reliability in Engineering. Object Reliability. Terms and Definitions*. Moscow: RST, 2021, 35 p.
3. State Standard 25870–83. *Macroclimatic regions of the globe with cold and temperate climates. Zoning and statistical parameters of climatic factors for technical purposes*. Moscow: Publ. House of Standards, 1984, 176 p.
4. Startsev O.V., Lebedev M.P., Kychkin A.K. Aging of polymer composite materials in extremely cold climates. *Izvestiya Altayskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, no. 1 (11), pp. 41–51. DOI: 10.14258/izvasu(2020)1-06.
5. Marakhovskiy P.S., Barinov D.Ya., Maltseva E.Yu. The effect of reinforcing additives on the structure and thermophysical properties of ice composite materials. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 4 (73), paper no. 11. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 25, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-4-111-121.
6. Hakimian A., Mohebinia M., Nazari M. et al. Freezing of few nanometers water droplets. *Nature Communications*, 2021, vol. 12, no. 1, pp. 1–8. DOI: 10.1038/s41467-021-27346-w.
7. Matveeva L.Yu., Yastrebinskaya A.V. Relationship between the supramolecular structure and properties of polymer composite materials based on thermosetting binders. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*, 2017, no. 12, pp. 49–54. DOI: 10.12737/article\_5a27cba0904cd3.84567882.
8. Skachkov Yu.B. Dynamics of long-term changes in air temperature extremes in Yakutsk. *Integrity and resource in extreme conditions*, 2024, no. 1, pp. 185–187. DOI: 10.24412/cl-37269-2024-1-185-187.
9. Kablov E.N., Laptev A.B., Prokopenko A.N., Gulyaev A.I. Relaxation of polymeric composite materials under the prolonged action of static load and climate (review). Part 1. Binders. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 4 (65), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 10, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80.
10. Startsev V.O., Valevin E.O., Gulyaev A.I. The influence of polymer composite materials' surface weathering on its mechanical properties. *Trudy VIAM*, 2020, no. 8 (90), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 10, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-64-76.
11. Ivanov M.S., Morozova V.S., Pavlukovich N.G. The influence of operational factors on the properties of carbon fiber based on polyetheretherketone. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 2 (75), paper no. 08. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: January 10, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-99-108.
12. Startsev V.O., Kutsevich K.E., Khrulev K.A., Molokov M.V. Predicting the surface temperature of composite material samples based on adhesive prepregs when exposed to climatic conditions. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, 2017, no. 9, pp. 24–31.
13. Kablov E.N., Startsev V.O. Measurement and forecasting of materials samples' temperature during weathering in different climatic zones. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-47-58.
14. Ammar M.A. *Bond Durability of Basalt Fibre-Reinforced Polymers (BFRP) bars under freeze-and-thaw conditions*: Thesis. Quebec, 2014, 105 p.
15. Parnas R., Shaw M., Liu Q. *Basalt Fiber Reinforced Polymer Composites*: Technical Report NETCR63. Institute of Materials Science, University of Connecticut, 2007, 133 p.

16. Alaimo G., Valenza A., Enea D., Fiore V. The durability of basalt fibres reinforced polymer (BFRP) panels for cladding. *Materials and Structures*, 2016, vol. 49, no. 6, pp. 2053–2064. DOI: 10.1617/s11527-015-0633-3.
17. Wu G., Wang X., Wu Z. et al. Durability of basalt fibers and composites in corrosive environments. *Journal of Composite Materials*, 2015, vol. 49, no. 7, pp. 873–887. DOI: 10.1177/0021998314526628.
18. Liu Q., Shaw M.T., Parnas R.S., McDonnell A.-M. Investigation of Basalt Fiber Composite Mechanical Properties for Applications in Transportation. *Polymer Composites*, 2006, vol. 27, pp. 41–48. DOI: 10.1002/pc.20162.
19. Dhand V., Mittal G., Rhee K.Y. et al. A short review on basalt fiber reinforced polymer composites. *Composites. Part B: Engineering*, 2015, vol. 73, no. 5, pp. 166–180. DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.12.011.
20. Chikhradze N.M., Japaridze L.A., Abashidze G.S. Properties of basalt plastics and of composites reinforced by hybrid fibers in operating conditions. *Composites and their applications*. Intech Open, 2012, pp. 243–268. DOI: 10.5772/48289.
21. Matykiewicz D., Lewandowski K., Dudzic B. Evaluation of thermomechanical properties of epoxy–basalt fibre composites modified with zeolite and silsesquioxane. *Composite Interfaces*, 2017, vol. 24, no. 5, pp. 489–498.
22. ACI 440.3R-04. *Guide test methods for fiber-reinforced polymers (FRPs) for reinforcing or strengthening concrete structures*. Farmington Hills: The American Concrete Institute, 2004, 40 p.
23. Akatenkov R.V., Aleksashin V.M., Anoshkin I.V., Babin A.N., Bogatov V.A., Grachev V.P., Kondrashov S.V., Minakov V.T., Rakov E.G. Criterion of the application efficiency of functionalized carbon nanotubes for improving the physico-mechanical properties of epoxy resins. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2010, no. 3, pp. 22–27.
24. Korolev G.V., Mogilev M.M., Golikov I.V. *Network polyacrylates. Microheterogeneous structures, physical networks, deformation and strength properties*. Moscow: Khimiya, 1995, 275 p.
25. Kychkin A.K., Popov V.V., Kychkin A.A. Study of the influence of extremely cold climate on the properties of basalt-plastic rods. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2020, vol. 22, no. 2 (94), pp. 25–31. DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-2-25-31.
26. Kychkin A.K., Popov V.V., Kychkin A.A. Climatic resistance of basalt-composite reinforcement. *Nauka i obrazovanie*, 2017, no. 1 (85), pp. 71–74.
27. Kablov E.N., Lebedev M.P., Startsev O.V., Golikov N.I. Climatic testing of materials, structural elements, machinery and equipment under conditions of extremely low temperatures. *Proc. VI Eurasian Symposium on Strength of Materials and Machines for Cold Climate Regions EURASTRENCOLD–2013*. Yakutsk, 2013, pp. 5–7.

*Информация об авторах*

**Мараховский Петр Сергеевич**, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Кычкин Айсен Анатольевич**, старший научный сотрудник, к.т.н., ФИЦ ЯИЦ СО РАН, presidium@prez.ys.ru

**Скуридина Наталья Степановна**, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

**Кычкин Анатолий Константинович**, ведущий научный сотрудник, к.т.н., ИФТПС СО РАН, administration@iptpn.ysn.ru

**Габышев Александр Александрович**, младший научный сотрудник, ФИЦ ЯИЦ СО РАН, presidium@prez.ys.ru

*Information about the authors*

**Peter S. Marakhovskiy**, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Aisen A. Kychkin**, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), FRC YaSC SB RAS, presidium@prez.ys.ru

**Natalia S. Skuridina**, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

**Anatoly K. Kychkin**, Leading Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), IPTPN SB RAS, administration@iptpn.ysn.ru

**Alexander A. Gabyshev**, Junior Researcher, FRC YaSC SB RAS, presidium@prez.ys.ru

Статья поступила в редакцию 16.04.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 16.04.2025.  
The article was submitted 16.04.2025; approved and accepted for publication after reviewing 16.04.2025.