

УДК 678.026.3

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНО ХОЛОДНОГО КЛИМАТА НА СВОЙСТВА БАЗАЛЬТОПЛАСТИКОВЫХ СТЕРЖНЕЙ

© 2020 А.К. Кычкян, В.В. Попов, А.А. Кычкян

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

Статья поступила в редакцию 02.04.2020

Волокно-армированные полимерные композиты быстро увеличивают интерес к доле рынка в конструкционных материалах из-за более высокого модуля прочности и хорошей коррозионной стойкости, связанной с меньшим весом и гибкостью конструкции. Целью данной работы является исследование влияния экстремально холодного климата на физико-механические свойства базальтопластиковых стержней. Для исходных и экспонированных образцов базальтопластиковых стержней определены изменения механических показателей. Результаты теплофизических исследований, позволяют обосновать высокую стабильность материалов по показателям термического расширения.

**Ключевые слова:** базальтопластиковый стержень, прочность, термомеханический анализ, линейное термическое расширение,

DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-2-25-31

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ  
в рамках научного проекта №18-29-05012.*

### ВВЕДЕНИЕ

Эффективность применения новых материалов зависит от решения ряда научно-технических проблем, в том числе проблемы оценки и прогнозирования эксплуатационной стойкости полимерных композиционных материалов (ПКМ) и изделий при одновременном воздействии климатических и эксплуатационных факторов.

Многообразие типов и структур ПКМ, а также разнообразие механизмов развития повреждений (дефектов), возникающих в материалах на стадии их эксплуатации в составе изделия в жестких климатических условиях, обуславливают принципиально важное положение о том, что решение задач повышения физико-механических и эксплуатационных свойств материалов невозможно без получения представительного объема достоверной экспериментальной информации. Более того, до сих пор признается, что единственным надежным методом определения срока службы материала или элемента является прямой натурный эксперимент.

Современным и перспективным продуктом для замены стальной арматуры является

Кычкян Анатолий Константинович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник.

E-mail: kychkinplasma@mail.ru

Попов Валерий Валентинович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник.

E-mail: popov\_valeriy@bk.ru

Кычкян Айсен Анатольевич, научный сотрудник.

E-mail: icen.kychkin@mail.ru

композитная арматура, изготовленная из пластика, армированного различными видами непрерывных волокон – арамидными волокнами, углеродными волокнами, стекловолокнами, базальтовыми волокнами, упакованными в полимерную матрицу.

Основными преимуществами композитной арматуры по отношению к металлической являются повышенные прочностные показатели, меньший вес, устойчивость к коррозии, хорошая адгезия с бетоном и равным с бетоном коэффициентом линейного расширения.

Мировой опыт по применению композитной арматуры в качестве эффективного заменителя насчитывает более 30 лет. Рядом стран приняты нормативные документы по применению и расчётам стеклопластиковой арматуры в строительстве [1-5].

Перспективным строительным материалом, обладающим такими же уникальными свойствами по сравнению с используемыми композитными материалами, является базальтопластиковая арматура (БПА).

Преимущества полимерных материалов, армированных базальтовыми волокнами, по механическим показателям, стоимости, стойкости к агрессивным средам, биологической стойкости обсуждены в ряде работ [6-16].

В [7] показано, что базальтопластики устойчивы к воздействию воды и химически активных растворов. После 250 суток пребывания в этих средах при комнатной температуре предел прочности при растяжении и модуль упругости

изменяются на 10–20%. По данным [9] пластины и прессованные слои пропитанного базальтового волокна устойчивы к воздействию сухого и влажного климата, однако их механические показатели нестабильны и флюктуируют в пределах до 30–40%. В работе [10] долговечность и разрушение базальтопластика сравнены с аналогичными показателями для стеклопластиков и углепластиков после пребывания во влажной среде и химически активных растворах. Показано, что системы, армированные базальтовыми волокнами, обладают высокой стойкостью к этим агрессивным воздействиям. Аналогичное сравнение выполнено в работах [11–13] и показано, что пределы прочности и модули упругости при растяжении, изгибе и сдвиге по своей стойкости не уступают стеклопластикам. В [14–16] исследована стойкость базальтопластиков к воздействию низких, высоких температур и термоциклов, и показана стабильность этих материалов к указанным воздействиям. В работах [17,18] аналогичные выводы о высокой устойчивости БПА к воздействию агрессивных сред получены после оценки влияния воды, солевых и щелочных растворов при нормальной и повышенной температурах на механические свойства стержней диаметром 11–12 мм. Образцы базальтопластиков на основе полиэфирной матрицы по данным [19] сорбировали до 2% нормальной и морской воды при комнатной температуре. Прочность при растяжении, изгибе и ударная вязкость снижались на 50–60%, особенно для образцов, у которых базальтовые волокна перед изготовлением композитов обрабатывались растворами  $H_2SO_4$  и NaOH.

Аналогичные механические свойства базальтопластиков, армированных мелконарезанным ровингом, тканями или одноосно ориентированными непрерывными волокнами, сопоставлены с углепластиками и стеклопластиками на основе ненасыщенных полиэфиров, эпоксифенольных и фенольноформальдегидных матриц [20]. Показано, что за 12 месяцев климатических испытаний в условиях Южного Кавказа наблюдается снижение прочности, зависящее от типа полимерной матрицы и величины приложенного растягивающего напряжения. Отмечено, что процессы старения развиваются на поверхности образцов, но каких-либо экспериментальных доказательств этого утверждения не приведено.

Хорошо известно, что процессы климатического старения в ряде случаев оказывают решающее воздействие на изменение механических свойств материалов и изделий, особенно при их эксплуатации в районах холодного климата.

Актуальной проблемой использования БПА в строительстве является подтверждение и обоснование сохранения свойств на высоком уровне в процессе длительной эксплуатации в разнообразных климатических условиях. Од-

нако во всех перечисленных работах [6–20] отсутствуют сведения об изменении свойств БПА строительного назначения под воздействием натуральных климатических условий экстремально холодного климата.

Целью данной работы является определение изменения основных физико-механических свойств базальтопластиковых стержней под влиянием факторов экстремально холодного климата Якутии.

## ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для проведения исследований были выбраны образцы, представляющие собой односторонне-направленные базальтопластиковые стержни на основе эпоксидиановой смолы, изготовленные в одной серии, едином временном интервале, диаметрами 6 и 8 мм, согласно ГОСТа 31938-2012 «Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций».

В качестве исходных значений свойств приняты результаты исследований, полученные после их изготовления. Для оценки изменения свойств под воздействием естественных климатических факторов, исследования свойств стержней БПА данной серии проводили после экспонирования 28 и 51 месяцев на открытых стендах климатической станции г. Якутска.

Во время экспонирования среднегодовая температура воздуха в Якутске составляло от -6,6°C до -7,7°C. Минимальная зарегистрированная температура составляло -47,9°C. Максимальная температура +35,0°C. Среднегодовая относительная влажность воздуха по месяцам варьировалась от 18% до максимальной 98%. Выпадение осадков в сумме оставляло среднем 225 мм за год. Доза годовой суммарной солнечной радиации составляло в среднем - 3680 МДж/м<sup>2</sup>.

Испытания на растяжение, сжатие и изгиб проводились на универсальной испытательной машине Z100 Zwick/Roell согласно ГОСТа 32492-2013 «Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций» «Методы определения физико-механических характеристик».

Измерение коэффициента линейного термического расширения (ТКЛР) образцов проводили на термомеханическом анализаторе ТМА 202 «NETZSCH-Geratebau GmbH» скоростью нагрева 5 К/мин в среде протока гелия со скоростью 70 мл/мин.

Измерения были проведены согласно ГОСТ Р 57754-2017 «Композиты полимерные. Метод определения линейного теплового расширения при помощи термомеханического анализа» в интервале температур -60 до + 100 °C.

Исключаемые систематические погрешности учитывались при калибровке относительных дилатометров по стандартной мере. Отно-

сительная погрешность измерений составляла 3% при доверительной вероятности 0,95 во всем интервале рабочих температур. За результат измерения принимали среднее арифметическое результатов наблюдений ТКЛР, в которые предварительно были введены поправки для исключения систематических погрешностей.

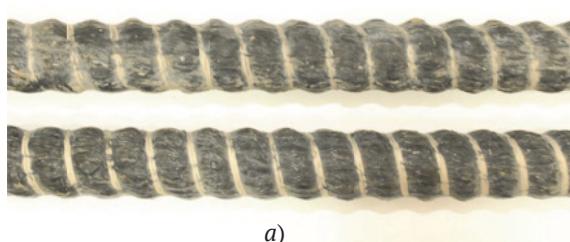
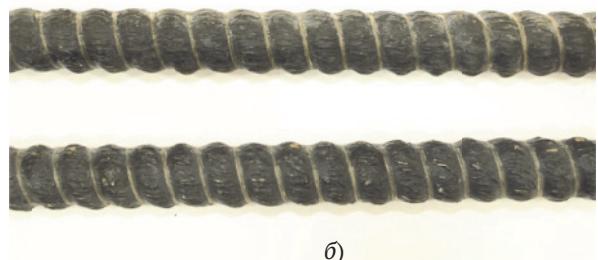
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При проведении визуального освидетельствования образцов базальтопластиковых стержней после 51 месяцев натурной экспозиции на климатической станции г. Якутска в образцах обнаружены потеря блеска, осветление, обрывы светлой оплеточной нити и полное оголение во-

локон с солнечной стороны (рис. 1 *a*). С теневой стороны образцов наблюдается осветление образцов и частичное оголение волокон (рис. 1*b*).

Из проведенных исследований следует, что при экспонировании начинается ухудшение поверхностного слоя композитных стержней, и тем самым, чем выше диаметр испытуемых образцов, чем больше дефектов в поверхностном слое с солнечной стороны выставленных образцов.

Полученные значения предела прочности при сжатии до и после экспонирования представлены в таблице 1. Результаты испытаний на сжатие показывают, что происходит несущественное увеличение этого показателя на 4-8% после экспозиции 28 месяцев и снижение после последующей экспозиции.

*a)**б)*

**Рис. 1.** Образцы стержней после натурной экспозиции на климатической станции г. Якутска:  
с солнечной (*a*) и теневой (*б*) стороны

**Таблица 1.** Значения предела прочности при сжатии для образцов БПА

Условия испытаний	Наименование нормативных документов для испытаний	Диаметр, мм	Предел прочности при сжатии $\sigma_{BC}$ , МПа	
Исходные значения до выставления	ГОСТ 32492-2013	6	410	
		8	466	
После экспозиции в течение 28 месяцев		6	428	
		8	504	
После экспозиции в течение 51 месяцев		6	405	
		8	485	

**Таблица 2.** Сравнительные результаты испытаний на продольный изгиб образцов

Условия испытаний	Наименование нормативных документов для испытаний	Диаметр, мм	Предел прочности при сжатии $\sigma_{BC}$ , МПа	
Исходные значения до выставления	ГОСТ 32492-2013	6	410	
		8	466	
После экспозиции в течение 28 месяцев		6	428	
		8	504	
После экспозиции в течение 51 месяцев		6	405	
		8	485	

Сравнительные результаты испытаний на продольный изгиб представлены в таблице 2. Результаты испытаний на изгиб показывают, что предел прочности при продольном изгибе повышается: для образцов Ø6 мм до 15-16%, для образцов Ø8 мм от 7% до 15%.

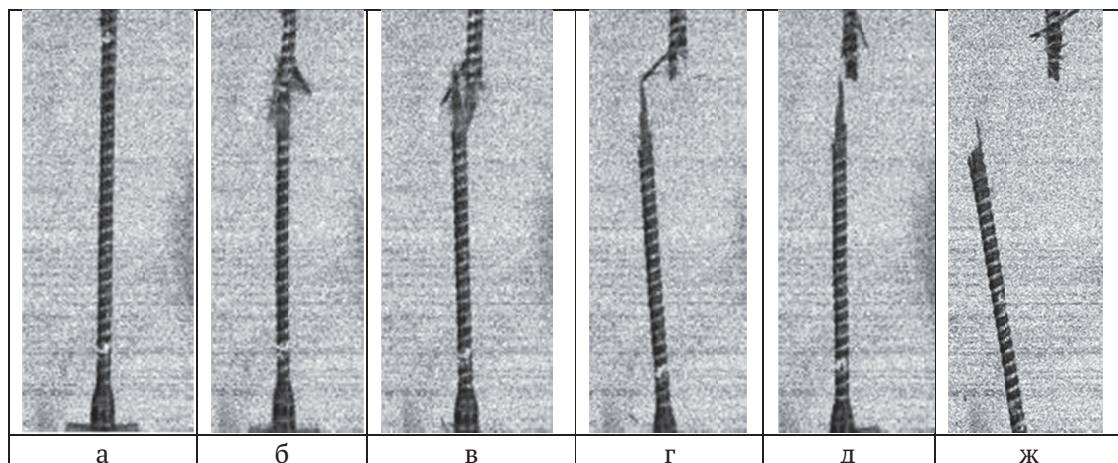
Результаты сравнительных испытаний образцов на осевое растяжение представлены в таблице 3.

Результаты испытаний на растяжение показывают, что предел прочности при растяжении также повышается: для образцов обоих диаметров от 6%, до 12%.

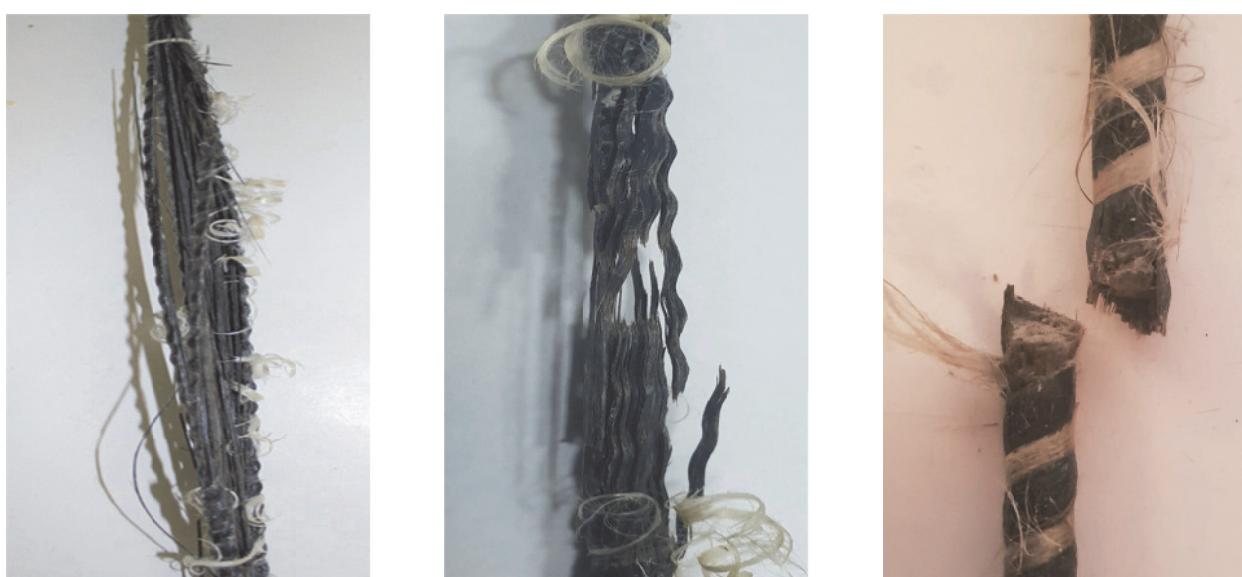
При проведении экспериментальных исследований прочности и деформативности установлено, что для исходных образцов, разрушение начинается, как правило, с разрыва оплеточной нити, образующей периодический

**Таблица 3.** Результаты сравнительных испытаний на осевое растяжение

Тип БПА	Наименование нормативных документов для испытаний	В исходном состоянии	После 28 мес.	После 51 мес.
		$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа
Стержни 6 мм	ГОСТ 32492-2013	1120,1	1205,8	1275,1
Стержни 8 мм		1003,4	1077,6	1080,8



**Рис. 2.** Этапы разрушения экспонированного образца БПА:  
а-1 кадр; б-д-разрушение образца с 2200-3200 кадра; ж-6900 кадр.



а)

б)

в)

**Рис. 3.** Характеры разрушения:

а) – вид разрушения исходного образца, б) вид разрушения после 28 месяцев экспонирования в) вид разрушения после 51 месяцев экспонирования

**Таблица 4.** Результаты ТКЛР по трем независимым образцам Ø6 мм  
и оценка погрешности измерения

Температурный интервал, °C (от 20 до $T_i$ )	Номер измерения	Значение ТКЛР $\bar{\alpha}_i \cdot 10^6$ , 1/K исх/после экспонирования 51 мес	Среднее значение ТКЛР $\bar{\alpha} \cdot 10^6$ , 1/K исх/после экспонирования 51 мес	Средняя квадратическая погрешность $\bar{S}_{\alpha}$ , 1/K исх/после экспонирования 51 мес
-60÷20	1	7,3 / 5,90	5,9 / 5,76	1,36 / 0,15
	2	3,2 / 5,61		
	3	7,3 / 5,78		
-0÷20	1	7,2 / 6,10	6,8 / 6,05	0,39 / 0,05
	2	6,0 / 6,04		
	3	7,2 / 6,00		
20÷50	1	7,4 / 6,37	7,0 / 6,38	0,21 / 0,01
	2	6,6 / 6,39		
	3	7,1 / 6,38		
20÷100	1	7,5 / 6,60	7,1 / 6,44	0,20 / 0,16
	2	6,8 / 6,43		
	3	7,1 / 6,29		

**Таблица 5.** Результаты ТКЛР по трем независимым образцам Ø8 мм  
и оценка погрешности измерения

Температурный интервал, °C (от 20 до $T_i$ )	Номер образцов	Значение ТКЛР $\bar{\alpha}_i \cdot 10^6$ , 1/K исх/после экспонирования 51 мес	Среднее значение ТКЛР $\bar{\alpha} \cdot 10^6$ , 1/K исх/после экспонирования 51 мес	Средняя квадратическая погрешность $\bar{S}_{\alpha}$ , 1/K исх/после экспонирования 51 мес
-60÷20	1	6,5 6,29	6,7 6,00	0,28 0,36
	2	7,3 5,60		
	3	6,4 6,11		
-0÷20	1	6,6 6,50	6,9 6,37	0,28 0,30
	2	7,5 6,03		
	3	6,7 6,59		
20÷50	1	6,8 6,67	7,0 6,64	0,29 0,34
	2	7,6 6,28		
	3	6,8 6,96		
20÷100	1	6,8 6,72	7,1 6,65	0,29 0,49
	2	7,6 6,12		
	3	6,7 7,09		

профиль. Затем следует разрыв отдельных волокон в поверхностном слое в рабочей части образца, после чего происходит более интенсивное разрушение волокон по периметру стержня с распространением к его центру, при этом рост нагрузки прекращается и наступает разрыв стержня. Этапы разрушения представлены на рисунке 2. Съемка производилась высокоско-

ростным видеорегистратором Photron Fastcam SA4 с частотой 4500 кадров/сек в течении 1,55 секунд. Разрушение образца происходило в течении 0,235 секунд.

Характерные виды разрушения в зависимости от срока экспонирования представлены на рис.3. Для исходных образцов – характер разрушения сопровождается с расслоением

волокон. Для образцов после экспонирования, разрушение начинается со сколов поверхностного слоя стержня, сопровождением разрыва оплеточной нити и дальнейшим разрушением в рабочей зоне образца. (рис.3 (б,в)). После экспонирования 28 месяцев – характер разрушения сопровождается разрывом стержня в виде «метелки», после 51 месяцев – характер разрушения в виде среза.

Результаты измерения среднего ТКЛР в диапазоне температур от 20 до  $T_i$  образцов приведены в таблицах 4 и 5.

Результаты измерений, приведенные в табл. 4 и 5, позволяют обосновать высокую стабильность базальтопластиковых стержней по показателям термического расширения.

## ВЫВОДЫ

В результате исследования установлено повышение прочностных характеристик после экспонирования в условиях холодного климата в течении 51 месяцев. Исследования характера разрушения позволяют обосновать повышение прочности соединений «волокно-матрица» в процессе экспозиции. Результаты теплофизических исследований, позволяют обосновать высокую стабильность базальтопластиковых стержней по показателям термического расширения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Институт Бетона Америки (The American Concrete Institute) (США): ACI 440.6-08 (2008), ACI 440.5-08 (2008), ACI 440.R-07(2007), ACI 440.1R-06 (2006) – «Руководство для проектирования и конструирования бетона, армированного стеклопластиковой арматурой» и - ACI's Committee 440, ACI 440.3R-04 (2004) – «Методики тестирования композитной арматуры».
2. Канадская Ассоциация Стандартов (Канада): CAN/CSA-S806-02 – «Проектирование и Разработка Строительных Конструкций с использованием Композитной Арматуры»; CAN/CSA-S6-06 – «Канадский Кодекс Проектирование Мостов и Шоссе».
3. Японское Сообщество Гражданских Инженеров (Japan Society for Civil Engineers): «Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforced Materials, 1997».
4. Итальянский Национальный Совет Исследования CNR-DT 203/2006 – «Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars.».
5. ГОСТ 31938-2012 «Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Общие технические условия»; ГОСТ 32492-2015 «Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Методы определения физикомеханических характеристик»; СП 295.1325800.2017 «Конструкции бетонные, армированные полимерной композитной арматурой. Правила проектирования»
6. V. Dhand, G. Mittal, K. Y. Rhee, S.-J. Park and D. Hui, «A short review on basalt fiber reinforced polymer composites», Composites Part B: Engineering, vol. 73, no. 5, pp. 166-180, 2015.
7. R. Parnas, M. Shaw and Q. Liu, «Basalt fiber reinforced polymer composites». Technical Report NETCR63. Institute of Materials Science, University of Connecticut, 133 p., 2007.
8. G. Alaimo, A. Valenza, D. Enea and V. Fiore «The durability of basalt fibres reinforced polymer (BFRP) panels for cladding», Materials and Structures. vol.49, no.6, pp. 2053–2064, 2016.
9. G. Wu, X. Wang, Z. Wu, Z. Dong and G. Zhang, «Durability of basalt fibers and composites in corrosive environments», Journal of Composite Materials, vol.49, no.7, pp. 873–887, 2015.
10. Q. Liu, M. T. Shaw, R. S. Parnas and A.-M. McDonnell, «Investigation of basalt fiber composite mechanical properties for applications in transportation», Polymer Composites, vol. 27, pp. 41-48, 2006.
11. H. Li, G. Xian, M. Ma. and J. Wu, (2012). «Durability and fatigue performances of basalt fiber/epoxy reinforcing bars», Proc. of 6th Int. Conf. on FRP Composites in Civil Engineering, Rome, Italy, pp.8, August 2012 [6th Int. Conf. on FRP Composites in Civil Engineering, Rome, Italy, 2012].
12. Y. Xie, K. Guan and L. Lai «Effect of chloride on tensile and bending capacities of basalt frp mesh reinforced cementitious thin plates under indoor and marine environments», International Journal of Polymer Science, vol. 2016, pp.7, 2016.
13. M.A. Ammar, «Bond durability of basalt fiber-reinforced polymers (BFRP) bars under freeze-and-thaw conditions» //Thesis, Quebec, Canada, 105 p., 2014.
14. M.Najafi, S.M.R. Khalili, and R.E. Farsani, «Accelerated heat aging study of phenolic/basalt fiber reinforced composites», Mechanics of Advanced Composite Structures, vol. 3, no. 1, pp. 1-7, 2016.
15. S.M.R. Khalili, M. Najafi and R.E. Farsani, «Effect of thermal cycling on the tensile behavior of polymer composites reinforced by basalt and carbon fibers», Mechanics of Composite Materials, vol. 52, no. 6, pp. 807–816, 2017.
16. A. El Refai «Durability and fatigue of basalt fiber-reinforced polymer bars gripped with steel wedge anchors», Journal of Composites for Construction, vol.19, no.5, pp. 04014078, 2014.
17. A. El Refai, F. Abed; and A. Altalmas, «Bond durability of basalt fiber-reinforced polymer bars embedded in concrete under direct pullout conditions», Journal of Composites for Construction, vol.18, no.7, pp. 04013006, 2013.
18. A. Pandian, M.Vairavan, W.J.J. Thangaiah and M. Uthayakumar, «Effect of moisture absorption behavior on mechanical properties of basalt fibre reinforced polymer matrix composites», Journal of Composites, vol. 2014, article ID 587980, 8 p., 2014.
19. N.M. Chikhradze, L.A. Japaridze and G.S. Abashidze «Properties of basalt plastics and of composites reinforced by hybrid fibers in operating conditions», in book Composites and their applications, edited by Ning Hu, pp. 243-268, 2012.
20. D. Matykiewicz, K. Lewandowski and B. Dudziec,

«Evaluation of thermomechanical properties of epoxy–basalt fibre composites modified with zeolite and silsesquioxane», Composite Interfaces, vol. 24, no. 5, pp. 489-498, 2017.

## RESEARCH OF THE EFFECT OF AN EXTREME COLD CLIMATE ON THE PROPERTIES OF BASALT PLASTIC RODS

© 2020 A.K. Kychkin, V.V. Popov, A.A. Kychkin

V.P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North, Yakutsk

This article presents the results of studies of the influence of an extremely cold climate on the physicomechanical properties of basalt plastic rods of a periodic profile. Changes in mechanical parameters were determined for the initial and exposed samples of basalt plastic reinforcement. After exposure in Yakutsk, an increase in strength properties by 4–12% was found, depending on the diameter of the rods. The results of thermophysical studies allow us to justify the high stability of the BPA in terms of thermal expansion.

*Key words:* basalt plastic reinforcement, strength, thermomechanical analysis, linear thermal expansion,  
DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-2-25-31

---

Anatoly Kychkin, the Candidate of Technics, Leading Staff Research. E-mail: kychkinplasma@mail.ru  
Valery Popov, the Candidate of Technics, Senior Staff Research. E-mail: popov\_valeriy@bk.ru  
Aisen Kychkin, Staff Research.  
E-mail: icen.kychkin@mail.ru