

ВЛИЯНИЕ ЦИКЛОВ ЗАМОРАЖИВАНИЯ-ОТТАИВАНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ И ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО ВЕРМИКУЛИТОБЕТОНА АРМИРОВАННОГО ИСКУССТВЕННОЙ ФИБРОЙ

Алексеев К.Н., Захаров Е.В.

*Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения
Российской академии наук, г. Якутск*

Ключевые слова: теплоизоляционный бетон, фибра, полипропиленовое волокно, базальтовое волокно, прочность при изгибе и сжатии, циклы замораживания-оттаивания, хрупкость разрушения.

Аннотация. В статье рассматриваются искусственные волокна (фибра) в качестве средства повышения удельной прочности теплозащитного токрет-бетона. Изложены результаты лабораторных исследований по определению влияния низко модульной полипропиленовой и высоко модульной базальтовой фибры диаметром 10÷23 мкм на прочность особо легкого конструкционно-теплоизоляционного бетона марки плотности D700 и легкого конструкционно-теплоизоляционного бетона D1000÷1100 по ГОСТ 25820-2021. В качестве теплоизоляционного заполнителя выступает песок из вспученного вермикулита. Приведено влияние циклов замораживания-оттаивания на прочность фибро-армированного вермикулитобетона на изгиб и сжатие, а также кривые "напряжение на изгиб – деформация". После воздействия 5 циклов по третьему ускоренному методу ГОСТ 10060-2012 ($t_{зам} = -50 \pm 2^\circ\text{C}$) прочность на сжатие образцов D1000 контрольной неармированной серии снизилась с 3,6 до 2,3 МПа и составляет 63% от исходной. В то же время, при объемном содержании полипропиленового волокна в 1,6% прочность образцов фибро-бетона в 1,5 раза превышает контрольную (0%, 0 ЦЗО) и после воздействия 5 циклов незначительно снизилась с 5,2 до 5 МПа. Установлено, что при изгибающей нагрузке разрушению образцов теплоизоляционного бетона армированного полипропиленовой фиброй предшествует пластическая деформация; мгновенного хрупкого разрушения не наблюдается, в том числе, после негативного воздействия циклов замораживания-оттаивания. Полученные данные свидетельствуют, что микро-армирование теплоизоляционного бетона искусственной фиброй может повысить его стойкость к статическим нагрузкам после воздействия знакопеременных температур; позволяет устранить хрупкость при разрушении на изгиб, тем самым повысить безопасность эксплуатации токрет-бетонных крепей и покрытий.

THE INFLUENCE OF FREEZE-THAW CYCLES ON THE STRENGTH AND NATURE OF DESTRUCTION OF HEAT-INSULATING VERMICULITE CONCRETE REINFORCED WITH ARTIFICIAL FIBER

Alekseev K.N., Zakharov E.V.

*N.V. Chersky Institute of Mining of the North of Siberian Branch of the Russian Academy of Science,
Yakutsk*

Keywords: thermal insulation concrete, fiber, polypropylene fiber, basalt fiber, flexural and compressive strength, freeze-thaw cycles, brittleness of fracture.

Abstract. The article discusses artificial fibers (fiber) as a means of increasing the specific strength of heat-insulating shotcrete. The article presents the results of laboratory studies to determine the effect of low-modulus polypropylene and high-modulus basalt fiber with a diameter of 10÷23 μm on the strength of extra-lightweight structural heat-insulating concrete of density grade D700 and lightweight structural heat-insulating concrete D1000÷1100 according to GOST 25820-2021. Sand from expanded vermiculite acts as a heat-insulating filler. The effect of freeze-thaw cycles on the bending and compression strength of fiber-reinforced vermiculite concrete, as well as the bending strength - deformation curves, are presented. After exposure to 5 cycles according to the third accelerated method of GOST 10060-2012 ($t = -50 \pm 2^\circ\text{C}$), the compressive strength of D1000 samples of the control unreinforced series decreased from 3.6 to 2.3 MPa and is 63% of the original. At the same time, with a volume content of polypropylene fiber of 1.6%, the strength of fiber concrete samples is 1.5 times higher than the control (0%, 0 CZO) and after exposure to 5 cycles slightly decreased from 5.2 to 5 MPa. It has been established that under bending load, the destruction of samples of heat-insulating concrete reinforced with polypropylene fiber is preceded by plastic deformation; instantaneous brittle destruction is not observed, including after the negative impact of freeze-thaw cycles. The obtained data indicate that micro-reinforcement of heat-insulating concrete with artificial fiber can increase its resistance to static loads after exposure to alternating temperatures; it eliminates brittleness during bending failure, thereby increasing the safety of operation of shotcrete concrete coatings.

Введение

Практика разработки месторождений северных территорий России показывает, что всё большее распространение получает подземный способ добычи полезных ископаемых. В комплексе вопросов, связанных со строительством шахт, рудников, тоннелей различного назначения и подземных сооружений, вопрос поддержания горных выработок пройденных в области криолитозоны является всё более актуальным и требующим выбора рациональных, надежных, экономичных способов их крепления.

Известно, что свойства и устойчивость многолетнемерзлых пород во многом зависят от температурного фактора. В зависимости от теплового режима эксплуатации подземных сооружений, конструкции и параметров крепи, окружающие многолетнемерзлые породы могут испытывать негативное воздействия протаивания, сезонных и суточных циклов замораживания-оттаивания, суффозии, сублимации льда и др. Установлено, что прочность кимберлита и карбонатных пород с алмазных месторождений Республики Саха (Якутия) существенно снижается (вплоть до дезинтеграции) после знакопеременного температурного воздействия [1]. Кроме того, изменение контуров и снижение устойчивости выработок пройденных в условиях многолетнемерзлых пород по причинам морозного выветривания и протаивания окружающих пород, отслеживается при любом тепловом режиме эксплуатации [2].

В ИГДС СО РАН была теоретически обоснована и доказана практическая возможность использования лёгких набрызг-бетонных крепей и покрытий на шахтах и рудниках Севера, выполняющих две функции – теплоизоляционную и несущую [3, 4]. Предложены конструкции и составы легких набрызг-бетонов на базе теплоизоляционных заполнителей: азерит, керамзит, вермикулит; определены их прочностные характеристики и теплопроводность. Результаты проведенных исследований показали, что слой теплозащитного покрытия снижает число циклов замораживания-оттаивания испытываемых породами приконтурного массива (сезонных и суточных), а также уменьшает ореол оттаивания вокруг выработок [5]. Несмотря на вышеописанные характеристики, теплозащитные крепи и покрытия массового внедрения не получили, ввиду: низкой морозостойкости, недостаточной прочности и более трудоёмкой технологии возведения [3].

Как известно одним из способов повышения прочности и морозостойкости строительного материала на цементном вяжущем, является введение в его состав (матрицу) волокнистых материалов (фибры) и получения на этой основе композиционного строительного материала (рис. 1) обладающего повышенными физико-механическими свойствами: вязкостью разрушения при статическом нагружении [6], прочностью на изгиб [7, 8], морозостойкостью [9-11] и т.д.



Рис. 1. Излом образца бетона армированного полипропиленовой фиброй

Перечень применяемых натуральных и искусственных волокон достаточно обширен [12-15], однако, применяемые в качестве армирующей фазы бетона волокнам должны удовлетворять следующим требованиям:

- химическая стойкость или инертность к щелочной среде цементного теста;
- высокая массовость производства и, как следствие, доступность для применения в гражданском строительстве;

– малый диаметр ≈ 20 мкм и менее; фибра малого диаметра обладает большей удельной длиной поверхности сцепления волокон с бетонной матрицей.

В этой связи, за счёт химической стойкости [16, 17], относительно малого диаметра [18, 19], стоимостных показателей, в качестве армирующей фазы для бетона заслуживают внимание высокомодульная базальтовая и низкомодульная полипропиленовая фибра.

Ранее проведенными в ИГДС СО РАН исследованиями установлено, образцы фибро-армированных серий тяжелого бетона D1900 обладают большей способностью сохранять сопротивляемость статической и динамической нагрузке после воздействия циклов замораживания-оттаивания [20]. В частности, после воздействия 5 циклов (температура замораживания минус $50 \pm 2^\circ\text{C}$) прочность на сжатие образцов контрольной (неармированной) серии снизилась примерно в два раза – с 31,7 до 16,7 МПа; при объемном содержании базальтовой фибры ВС23-6-61 в 1,3% (2% от массы сухих компонентов) прочность фибробетона составляет 95% от контрольной – 30,1 МПа.

В связи с вышеописанным, было изучено влияние циклов замораживания-оттаивания на прочность при изгибе и сжатии теплоизоляционного бетона в зависимости от содержания искусственной фибры.

Объект исследований:

– особо легкий конструкционно-теплоизоляционный бетон «Цемент / Вермикулитовый песок = 1/4» (по объёму) марки средней плотности D700 по ГОСТ 25820-2021;

– легкий конструкционно-теплоизоляционный или конструкционный бетон «Цемент / Вермикулитовый песок = 1/2» D900-1000.

Идея работы заключается во введении высокомодульных базальтовых или низкомодульных полипропиленовых волокон в матрицу теплоизоляционного вермикулитобетона для повышения его сопротивляемости статической нагрузке.

Целью работы является обеспечение составам легкого теплоизоляционного бетона повышенной стойкости к статическим нагрузкам после воздействия знакопеременных температур.

Методика эксперимента

Прочность исследуемых образцов бетона определялась в соответствии с ГОСТ 10180-2012, 310.4-81, 18105-2018. Образцы подвергались кратковременному статическому разрушению на электромеханической универсальной испытательной машине UTS-250 (погрешность измерения в диапазоне $0,8 \div 2 \text{ кН}$ – 0,8%, в диапазоне $2 \div 250 \text{ кН}$ – 0,5% от измеренной величины). Прочность при изгибе определялась на образцах размерами $40 \times 40 \times 160$ мм, на образованных половинках образцов-балочек определялся предел прочности на сжатие.

По достижении возраста 28 суток исследуемые образцы подвергались воздействию циклов замораживания-оттаивания в соответствии с ГОСТ 10060-2012 по третьему ускоренному методу, образцы насыщались 5% водным раствором NaCl и подвергались замораживанию при температуре минус $(50 \pm 2)^\circ\text{C}$ в среде насыщения.

В ходе изготовления образцов были использованы следующие материалы:

– цемент М400 производства ОАО ПО «ЯКУТЦЕМЕНТ»;

– песок речной, карьер «Пригородный» (г. Якутск), сод. ГИП = 0,39%, насыпная плотность $1417,9 \text{ кг/м}^3$, $M_k = 1,2$;

– вермикулитовый песок фракцией $0,6 \div 2$ мм ВВТ-150 ГОСТ 12865-67 производства ООО «ПО Химцентр» (г. Новосибирск), насыпная плотность $\approx 140 \div 305 \text{ кг/м}^3$, истинная плотность 2846 кг/м^3 ;

– фибра полипропиленовая марки ВСМ-6 покрытая замасливателем способствующим рассеиванию и сцеплению фибр с цементным раствором, диаметр $10 \div 15$ мкм, длина 6 мм;

– фибра базальтовая марки ВС23-6-61, покрытая замасливателем «Водная эмульсия №61», диаметр 23 мкм, длина 6 мм.

Расход компонентов смеси на изготовление образцов представлен в таблице 1. Водоцементное отношение не изменялось. Содержание фибры варьировалось от 0 до 4% от общей

массы бетонной смеси. Смешение компонентов смеси производилось при помощи дрели с насадкой «миксер», уплотнение на виброплощадке СМЖ-539. Образцы выдерживались в эксикаторах при 100% влажности среды и температуре $20 \pm 1^\circ\text{C}$ в течении 28 суток.

В ходе предварительных испытаний было установлено влияние искусственной фибры на прочность вермикулито-бетона в проектном возрасте 28 суток, у базальтовой содержание фибры варьировалось от 1 до 4% от массы смеси, у полипропиленовой от 0,5 до 2%.

Табл. 1. Расход компонентов на изготовление образцов теплоизоляционного бетона

Фибра			Цемент / Вермикулит	Вода / Цемент	Расход компонентов смеси, кг/м ³			
Марка	%	μ , %			Цемент	Вода	Вермикулит	Фибра
ВСМ-6	0	0	1/2 D1000	1,2	532	638	291	0
	1	1,6						14,6
	2	3,2						29,2
	0	0	1/4 D700	2,4	301	724	330	0,0
	1	1,5						13,6
	2	3						27,1
ВС23-6-61	0	0	1/2 D1100	1,1	593	653	325	0,0
	2	1,2						31,4
	4	2,4						62,8
	0	0	1/4 D700	2,4	310	743	339	0,0
	2	1,05						27,8
	4	2,1						55,7

Примечание: μ – объемное содержание фибры, %; D700 – марка плотности бетона ГОСТ 25820-2021, кг/м³.

Результаты проведенных исследований

Влияние циклов замораживания-оттаивания на прочность образцов теплоизоляционного фибро-бетона представлена в таблице 2 и на рисунках 2-8.

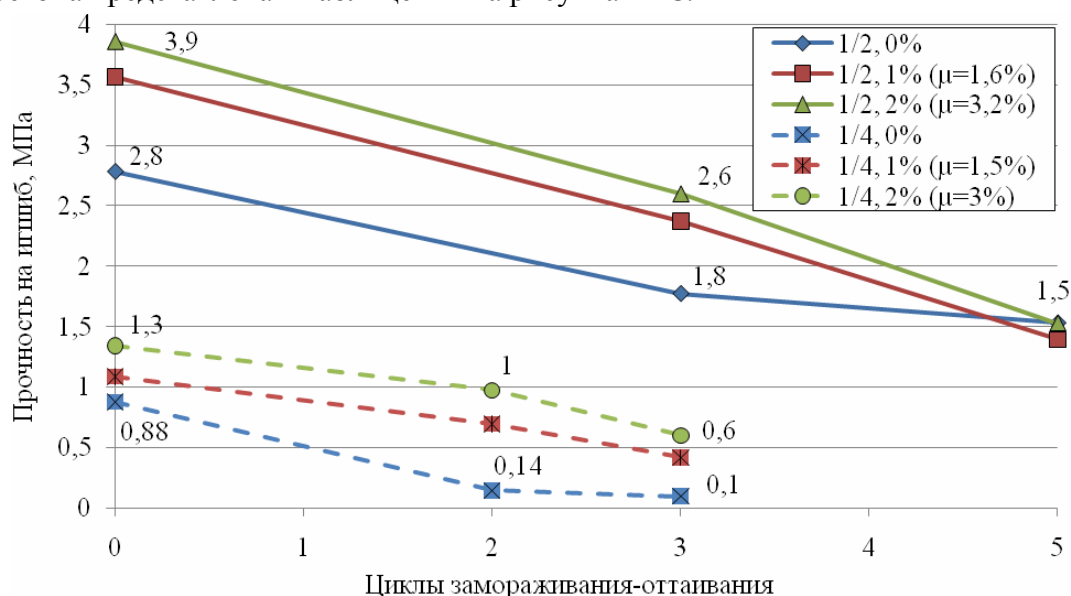


Рис. 2. Влияние циклов замораживания-оттаивания и содержания полипропиленового волокна ВСМ-6 на предел прочности при изгибе теплоизоляционного бетона "Ц/Верм=1/2" D1000 и "Ц/Верм=1/4" D700, где μ – объемное содержание фибры

Как видно из данных таблицы 2 и графиков, представленных на рисунке 2, образцы бетона армированные полипропиленовой фиброй прочнее и лучше сохраняют стойкость к статическим нагрузкам после воздействия знакопеременных температур. Приrost прочности на изгиб бетона D1000 армированного полипропиленовой фиброй составил $28 \div 39\%$ с 2,8 до 3,6÷3,9 МПа при μ в 1,6 и 3,2% соответственно. Кроме того, после воздействия знакопеременных температур, фибро-армированные образцы теплоизоляционного бетона

обладают более высокой способностью сохранять прочность при изгибе: после 3 циклов прочность образцов контрольной неармированной серии снижается с 2,8 до 1,8 МПа, а при содержании фибры в 2% ($\mu = 3,2\%$) с 3,9 до 2,6 МПа. Аналогичная ситуация наблюдается у составов бетона D700 (табл. 2).

Табл. 2. Влияние искусственной фибры на прочность теплоизоляционного бетона D1000-1100 на сжатие и изгиб

Фибра			Циклы замораживания-оттаивания	Сжатие			Изгиб		
Марка	%	μ , %		МПа	%	V_m , %	МПа	%	V_m , %
BCM-6, D1000	0	0	0	3,56	100	6,6	2,8	100	4,0
			3	2,81	79	0,9	1,8	64	7,9
			5	2,25	63	4,0	1,5	55	5,1
	1,0	1,6	0	5,16	145	2,1	3,6	128	3,1
			3	4,98	140	3,1	2,4	85	11,7
			5	4,19	118	5,0	1,4	50	10,9
	2,0	3,2	0	5,03	141	3,2	3,9	139	6,5
			3	3,92	110	6,2	2,6	93	12,2
			5	3,58	101	4,0	1,5	55	9,8
BC23-6-61, D1100	0	0	0	5,56	100	13,9	3,2	100	3,0
			3	3,20	57	11,1	1,7	51	14,7
			5	2,24	40	7,4	0,8	26	17,8
	2	1,2	0	7,28	131	5,6	4,1	127	10,2
			3	4,40	79	11,9	2,3	70	8,3
			5	3,42	61	13,9	1,3	41	7,1
	4	2,4	0	7,54	136	18,7	5,2	161	12,4
			3	4,69	84	19,2	1,5	46	45,4
			5	3,42	62	19,3	1,6	48	10,8
BCM-6, D700	0	0	0	1,30	100	10,3	0,9	100	2,4
			2	0,73	49	8,9	0,1	16	38,5
			3	0,61	36	13,2	0,1	11	49,1
	1	1,5	0	1,66	110	4,0	1,1	123	21,0
			2	1,12	86	7,1	0,7	79	10,9
			3	0,85	76	13,4	0,4	47	20,4
	2	3	0	1,90	129	8,9	1,3	152	10,6
			2	1,28	96	5,2	1,0	111	11,3
			3	0,98	92	8,3	0,6	68	16,9
BC23-6-61, D700	0	0	0	1,50	100	3,6	1,0	100	6,4
			2	0,73	56	10,9	0,3	30	13,0
			3	0,55	47	13,4	0,2	20	8,2
	2	1,05	0	1,66	128	10,9	1,1	111	9,4
			2	1,30	86	8,6	0,4	37	18,3
			3	1,13	65	11,2	0,2	25	2,9
	4	2,1	0	1,94	146	10,0	1,2	128	4,5
			2	1,45	98	14,0	0,4	42	22,4
			3	1,38	75	11,0	0,3	33	5,4

Примечание: V_m – текущий коэффициент вариации по ГОСТ 18105-2018, %.

Как видно из кривых «Прочность на изгиб – Деформация», представленных на рисунке 3, образцы контрольной неармированной серии при достижении предельной изгибающей нагрузки разрушаются хрупко, мгновенно разделяясь на две половины.

Сравнивая кривые разрушения бетона D1000 «Цемент/Вермикулитовый песок = 1/2», представленные на рисунках 3-5, можно сделать вывод, что разрушению фибро-бетона предшествует пластическая деформация (рис. 4, 5) хрупкого мгновенного разрушения исследуемых образцов не наблюдается (рис. 3). Кроме того, прогиб (деформация) до

разрушения у неармированных образцов бетона меньше, чем у фибро-армированных примерно в два раза. Волокна, равномерно распределенные в бетонной матрице, создают арматурный скелет из микро-фибр (рис. 1) и способствуют торможению развития трещин под действием разрушающей нагрузки.

На рисунке 6 представлены характерные кривые «напряжение при изгибе – деформация» образцов фибро-армированного и неармированного бетона. По достижении нагрузки приблизительно в 3 МПа можно оценить работу полипропиленового волокна при деформировании и разрушении композиционного строительного материала.

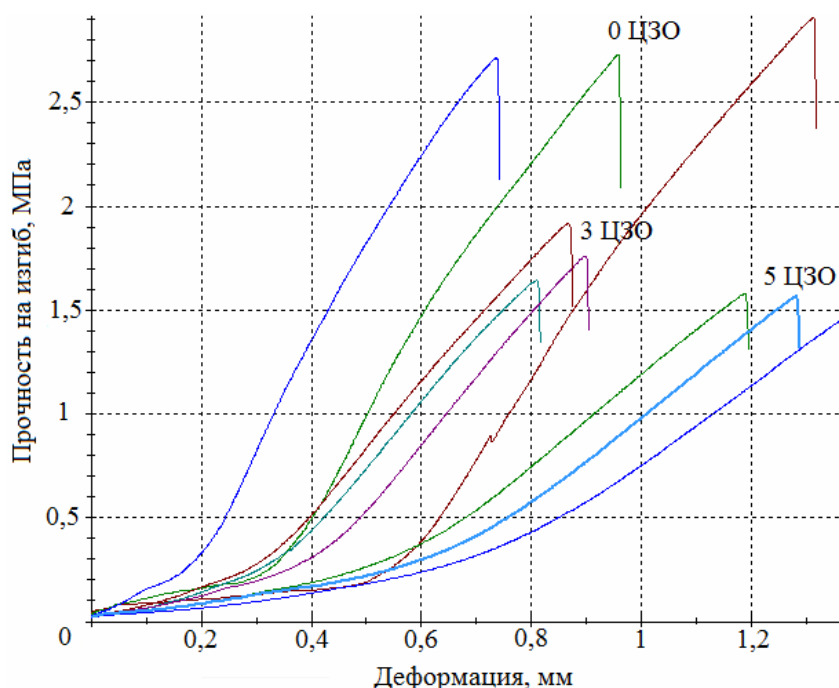


Рис. 3. Влияние циклов замораживания-оттаивания (ЦЗО) на кривые деформации при разрушении бетона D1000 на изгиб

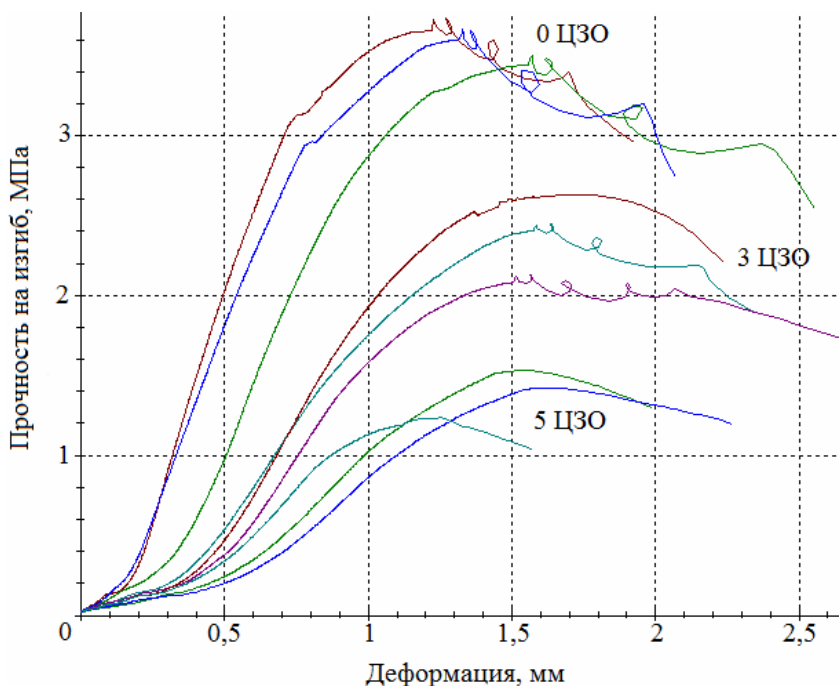


Рис. 4. Влияние циклов замораживания-оттаивания на кривые деформации при разрушении бетона D1000 на изгиб, содержании полипропиленовой фибры 1% от массы смеси ($\mu = 1,6\%$)

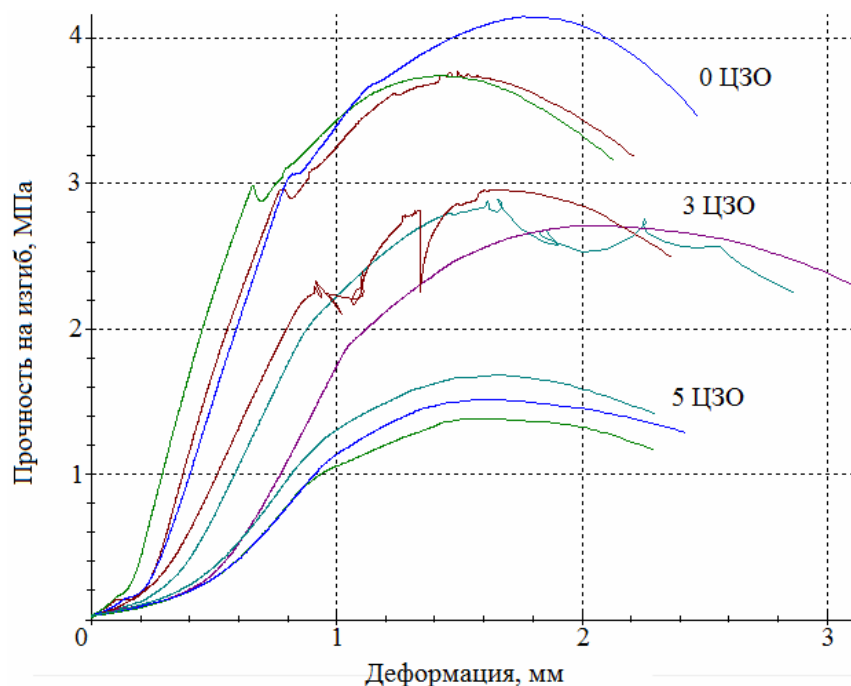


Рис. 5. Влияние циклов замораживания-оттаивания на кривые деформации при разрушении бетона D1000 на изгиб, содержания полипропиленовой фибры 2% от массы смеси ($\mu = 3,2\%$)

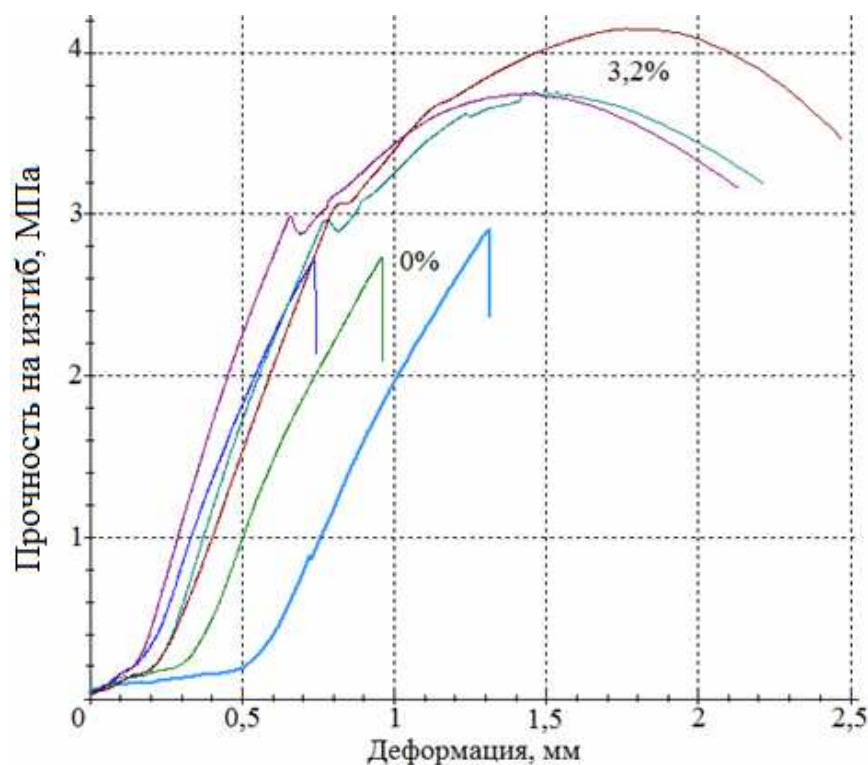


Рис. 6. Прочность при изгибе бетона D1000, при объемном содержании полипропиленовой фибры 0 и 3,2% (2% от общей массы $29,2 \text{ кг/м}^3$)

Образцы теплоизоляционного бетона D1100, армированные базальтовой фиброй, также обладают более высокой прочностью на изгиб по сравнению с контрольными, в том числе после воздействия циклов замораживания-оттаивания (табл. 2). Так, после 5 циклов прочность контрольных образцов снизилась с 3,2 до 0,8 МПа, в то время как, при $\mu = 2,4\%$ она сократилась с 5,2 до 1,6 МПа. Необходимо отметить, что значительных пластических деформаций при разрушении образцов армированных базальтовой фиброй на изгиб не наблюдается (рис. 7).

На графиках, представленных на рисунке 8, и в таблице 2 приведены результаты испытаний теплоизоляционного бетона на сжатие в зависимости от содержания полипропиленовой фибры и воздействия знакопеременных температур.

После воздействия 3 и 5 циклов замораживания-оттаивания прочность образцов фибробетона D1000 превышает контрольную. В случае, если бы испытания на сжатие проводились на образцах размерами 100×100×100 мм, а не на половинах образцов-балочек, то в соответствии с ГОСТ 10060-2012 введение полипропиленовых волокон ВСМ-6 при $\mu = 1,6-3,2\%$ могло бы обеспечить теплоизоляционному вермикулито-бетону D1000 марку морозостойкости F200.

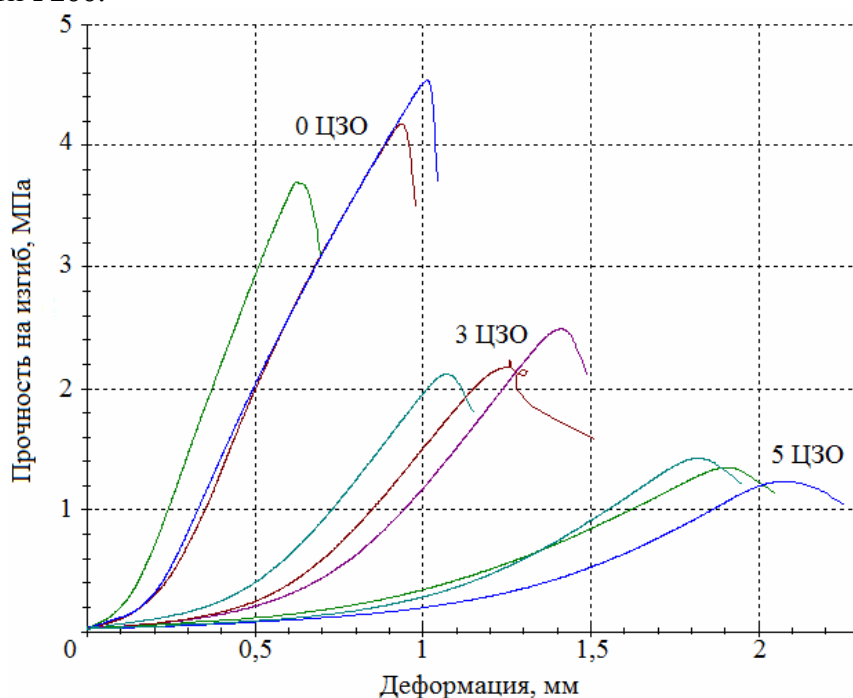


Рис. 7. Влияние циклов замораживания-оттаивания на кривые деформации при разрушении бетона D1100 на изгиб, содержание базальтовой фибры 2% от массы смеси ($\mu = 1,2\%$)

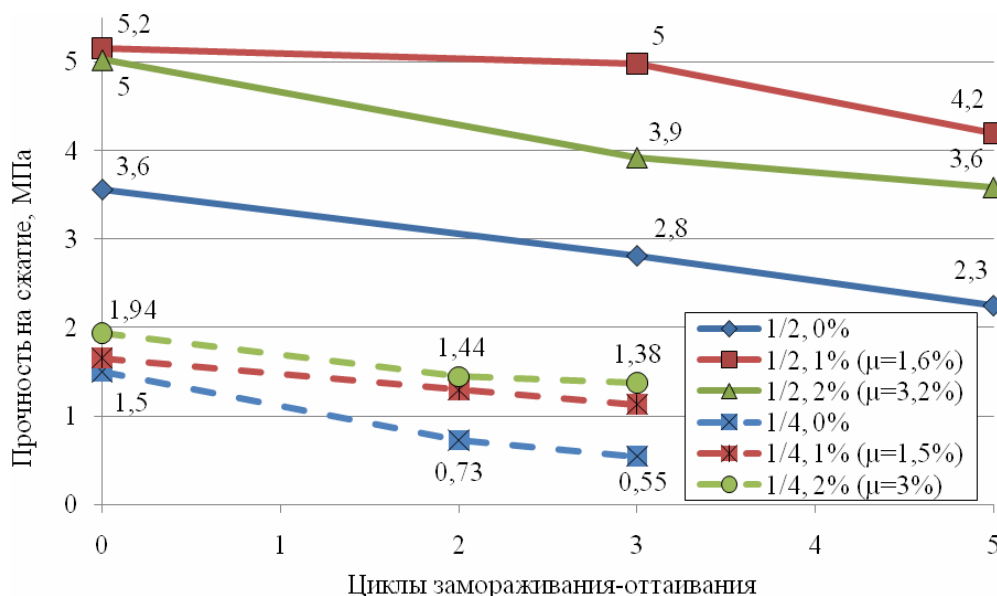


Рис. 8. Влияние полипропиленовой фибры ВСМ-6 и циклов замораживания-оттаивания на прочность при сжатии бетона "Ц/Верм=1/2" D1000 и "Ц/Верм=1/4" D700

При $\mu = 3\%$ прочность на сжатие бетона D700 после воздействия 2 циклов составила 1,45 МПа, что составляет более 95% прочности образцов контрольной серии (1,5 МПа) и соответствует марке морозостойкости F75.

Как видно из данных таблицы 2 прочность бетона D700, армированного базальтовой фиброй, при $\mu=2,1\%$ после 2 циклов составляет 1,28 МПа, что также более 95% прочности на сжатие образцов контрольной серии – 1,3 МПа.

Бетон, благодаря наличию в своей матрице искусственных волокон приобретает повышенную несущую способность и способность сохранять её после воздействия знакопеременных температур.

Несмотря более высокое весовое содержание базальтовых волокон по сравнению с полипропиленовыми (табл. 1) в матрице теплоизоляционного бетона высокомодульная базальтовая фибра оказала меньшее влияние на прирост его прочности (табл. 2). В этой связи, применение полипропиленовой фибры ВСМ-6 для армирования теплоизоляционного бетона D700, D1000 выглядит предпочтительнее.

Заключение

Результаты проведенных исследований свидетельствуют, что применение полипропиленовой и базальтовой фибры в качестве микро-арматуры торкрет-бетонных теплоизоляционных покрытий может способствовать повышению их сопротивления статическим нагрузкам после воздействия циклов – замораживания оттаивания, тем самым повысив их морозостойкость. Введение полипропиленовых волокон в матрицу теплоизоляционного бетона позволяет справиться с одним из негативных свойств всех бетонов – хрупким разрушением; при изгибающих нагрузках разрушению образцов фибробетона предшествует пластическая деформация, мгновенного разрушения не наблюдается.

Полученные данные могут способствовать повышению безопасности труда горнорабочих, расширению области применения теплозащитных торкрет-бетонов с использованием их в различных геокриологических условиях и повышению их долговременной устойчивости (безремонтный период).

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0297-2021-0021, ЕГИСУ НИОКТР № 122011800083-0).

Список литературы

1. Курилко А.С. Экспериментальные исследования влияния циклов замораживания-оттаивания на физико-механические свойства горных пород. – Якутск.: Изд-во СО РАН, 2004. – 154 с.
2. Авксентьев И.В., Скуба В.Н. Теплоизоляция горных выработок в условиях многолетней мерзлоты. – Новосибирск: Наука, 1983. – 176 с.
3. Галкин А.Ф., Киселев В.В., Курилко А.С. Набрызгбетонная теплозащитная крепь. – Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1992. – 164 с.
4. Васильев П.Н., Курилко А.С., Хохолов Ю.А., Шерстов В.А. Тепловой режим угольных шахт Якутии и способы его регулирования. – Якутск: ЯНЦ СО РАН, 2009. – 244 с.
5. Соловьев Д.Е., Хохолов Ю.А., Захаров Е.В. Изменение контуров незакрепленной горной выработки под воздействием циклов замораживания – оттаивания // Труды Всероссийской научно-практической конференции, посвященной памяти чл.-кор. РАН Новопашина М.Д. – Якутск: Изд-во Ин-та мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2011 – С. 270-273.
6. Кюлекчи Г., Чуллу М., Йилмаз А.О. Механические свойства торкрет-бетона с регенерированным заполнителем из строительных отходов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2023. – №3. – С. 34-47. – DOI: 10.15372/FTPRPI20230304.
7. Холодняк М.Г., Нажуев М.П., Зарецкий А.В., Фоминых Ю.С., Доценко Н.А. Зависимость прочности на растяжение при изгибе центрифугированного бетона от фибрового армирования дисперсными волокнами различных видов // Вестник евразийской науки. – 2019. – Т. 11, № 3. – С. 51.
8. Харун М., Коротеев Д.Д., Дхар П., Ждеро С., Елроба Ш.М. Физико-механические свойства базальто-волокнистого высокопрочного бетона // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2018. – Т. 14, № 5. – С. 396-403. – DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-5-396-403.
9. Соболев Г.М., Зотов А.Н. Морозостойкость и водонепроницаемость модифицированного мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй // Вестник научных конференций. – 2018. – № 5-2(33). – С. 89-91.
10. Перфилов В.А., Габова В.В., Лукьяница С.В. Бетон для строительства подводных нефтегазовых сооружений // Инженерный вестник Дона. – 2020. – № 11(71). – С. 313-320.
11. Kang J., Chen X, Yu Z. Effect of polypropylene fiber on frost resistance and carbonation resistance of manufactured sand concrete // Structures. 2023, vol. 56, p. 104896. doi.org/10.1016/j.istruc.2023.104896.

12. Окольников Г.Э., Новиков Н.В., Старчевская А.Ю., Пронин Г.С. Влияние базальтовой фибры на прочность бетона // Системные технологии. – 2019. – № 2(31). – С. 37-40.
13. Yoo D-Y, Banthia N. Impact resistance of fiber-reinforced concrete – A review // Cement and Concrete Composites. 2019, vol. 104, p. 103389. doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103389.
14. Abbass W., Khan M.I., Mourad S. Evaluation of mechanical properties of steel fiber reinforced concrete with different strengths of concrete // Construction and Building Materials. 2018, vol. 168, pp. 556-569. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.164.
15. Ahmad W., Farooq S.H., Usman M., Khan M., Ahmad A., Aslam F., Yousef R.A., Abduljabbar H.A., Sufian M. Effect of Coconut Fiber Length and Content on Properties of High Strength Concrete // Materials. 2020, vol. 13(5), p. 1075. doi.org/10.3390/ma13051075.
16. Бабаев В.Б., Строкова В.В., Нелюбова В.В., Савгир Н.Л. К вопросу о щелочестойкости базальтовой фибры в цементной системе // Вестник БГТУ имени В.Г. Шухова. – 2013. – №2. – С. 63-66.
17. Wang Q., Ding Y., Randl N. Investigation on the alkali resistance of basalt fiber and its textile in different alkaline environments // Construction and Building Materials. 2021, vol. 272, p. 121670. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121670.
18. Боровских И.В. Высокопрочный тонкозернистый базальтофибробетон: дисс. ... канд. техн. наук. – Казань: Казан. гос. архитектур.-строит. ун-т., 2009. – 168 с.
19. Боровских И.В., Хозин В.Г. Изменение длин базальтовых волокон при его распределении в композиционном вяжущем высокопрочных базальтофибробетонов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2009. – №2(12). – С. 233-237.
20. Алексеев К.Н., Курилко А.С. Разработка мелкозернистого ударопрочного фибробетона для применения в условиях рудников криолитозоны // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – №12-1. – С. 15-28. – DOI: 10.25018/0236_1493_2021_121_0_15.

References

1. Kurilko A.S. Experimental studies of the effect of freeze-thaw cycles on the physical and mechanical properties of rocks. – Yakutsk.: Publ. house of the SB RAS, 2004. – 154 p.
2. Avksentyev I.V., Skuba V.N. Thermal insulation of mine workings in permafrost conditions. – Novosibirsk: Science, 1983. – 176 p.
3. Galkin A.F., Kiselev V.V., Kurilko A.S. Shotcrete thermal insulation lining. – Yakutsk: YaSC of the SB RAS, 1992. – 164 p.
4. Vasiliev P.N., Kurilko A.S., Khokholov Y.A., Sherstov V.A. Thermal regime of coal mines in Yakutia and methods of its regulation. – Yakutsk: YaSC of the SB RAS, 2009. – 244 p.
5. Soloviev D.E., Khokholov Yu.A., Zakharov E.V. Changes in the contours of an unsecured mine working under the influence of freeze-thaw cycles // Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical conference dedicated to the memory of corr.-mem. Of the RAS Novopashin M.D. – Yakutsk: Publ. house of the Melnikov Permafrost Institute of the SB RAS, 2011. – P. 270-273.
6. Külekçi G., Chullu M., Yilmaz A.O. Mechanical properties of shotcrete with reclaimed filler from construction waste // Physical and technical problems of mining. 2023, no. 3, pp. 34-47. DOI: 10.15372/FTPRPI20230304.
7. Kholodnyak M.G., Nazhnev M.P., Zaretsky A.V., Fominykh Y.S., Dotsenko N.A. Dependence of the tensile strength in bending of centrifuged concrete on fiber reinforcement with dispersed fibers of various types // Bulletin of Eurasian Science. 2019, vol. 11, no. 3, p. 51.
8. Harun M., Koroteev D.D., Dhar P., Zhdero S., Elroba Sh.M. Physical and mechanical properties of basalt-fiber high-strength concrete // Structural Mechanics of Engineering Structures and Constructions. 2018, vol. 14, no. 5, pp. 396-403. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-5-396-403.
9. Sobolev G.M., Zotov A.N. Frost resistance and water resistance of modified fine-grained concrete with polypropylene fiber // Bulletin of scientific conferences. 2018, no. 5-2(33), pp. 89-91.
10. Perfilov V.A., Gabova V.V., Lukyanitsa S.V. Concrete for the construction of underwater oil and gas structures // Engineering Bulletin of the Don. 2020, no. 11(71), pp. 313-320.
11. Kang J., Chen X, Yu Z. Effect of polypropylene fiber on frost resistance and carbonation resistance of manufactured sand concrete // Structures. 2023, vol. 56, p. 104896. doi.org/10.1016/j.istruc.2023.104896.
12. Okolnikova G.E., Novikov N.V., Starchevskaya A.Yu., Pronin G.S. The influence of basalt fiber on the strength of concrete // System technologies. 2019, no. 2(31), pp. 37-40.
13. Yoo D-Y, Banthia N. Impact resistance of fiber-reinforced concrete – A review // Cement and Concrete Composites. 2019, vol. 104, p. 103389. doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103389.
14. Abbass W., Khan M.I., Mourad S. Evaluation of mechanical properties of steel fiber reinforced concrete with different strengths of concrete // Construction and Building Materials. 2018, vol. 168, pp. 556-569. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.164.
15. Ahmad W., Farooq S.H., Usman M., Khan M., Ahmad A., Aslam F., Yousef R.A., Abduljabbar H.A., Sufian M. Effect of Coconut Fiber Length and Content on Properties of High Strength Concrete // Materials. 2020, vol. 13(5), p. 1075. doi.org/10.3390/ma13051075.

16. Babaev V.B., Strokova V.V., Nelyubova V.V., Savgir N.L. On the issue of alkali resistance of basalt fiber in a cement system // Bulletin of BSTU n.a. V.G. Shukhov. 2013, no. 2, pp. 63-66.
17. Wang Q., Ding Y., Randl N. Investigation on the alkali resistance of basalt fiber and its textile in different alkaline environments // Construction and Building Materials. 2021, vol. 272, p. 121670. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121670.
18. Borovskikh I.V. High-strength fine-grained basalt fiber concrete: diss. ... cand. of tech. sc. – Kazan: Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, 2009. – 168 p.
19. Borovskikh I.V., Khozin V.G. Change in the lengths of basalt fibers during its distribution in the composite binder of high-strength basalt fiber concrete // Bulletin of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. 2009, no. 2(12), pp. 233-237.
20. Alekseev K.N., Kurilko A.S. Development of fine-grained impact-resistant fiber concrete for use in cryolithozone mines // Mining information and analytical bulletin. 2021, no. 12-1, pp. 15-28. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_121_0_15.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Алексеев Константин Николаевич – младший научный сотрудник	Alekseev Konstantin Nikolaevich – junior researcher
Захаров Евгений Васильевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник const1711@mail.ru	Zakharov Evgeniy Vasilievich – candidate of technical sciences, senior researcher

Получена 07.11.2024