

РАЗРАБОТКА МЕЛКОЗЕРНИСТОГО УДАРОПРОЧНОГО ФИБРОБЕТОНА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В УСЛОВИЯХ РУДНИКОВ КРИОЛИТОЗОНЫ

К. Н. Алексеев¹, А. С. Курилко¹

¹ Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН, Якутск, Россия

Аннотация: Изложены результаты исследований по определению влияния полипропиленовой и базальтовой фибры диаметром 10 ± 23 мкм на физико-механические характеристики мелкозернистого бетона. Приведены закономерности влияния циклов замораживания-оттаивания (температура замораживания минус 50 ± 2 °С ГОСТ 10060–2012) на прочность при изгибе и сжатии, а также энергоёмкость разрушения фибробетона. Установлено оптимальное содержание фибр марок ВСМ-6 и ВС23–6–61 в матрице мелкозернистого бетона. Обнаружено, что введение базальтовой фибры в матрицу бетона способно увеличить его морозостойкость. Так, при содержании 2% волокна после воздействия пяти циклов замораживания-оттаивания среднее значение прочности фиброармированных образцов оказалось только на 5% ниже контрольной серии образцов, не содержащих фибры и не подвергавшихся замораживанию-оттаиванию (0%, 0 ЦЗО), а неармированные снизили прочность на 47%. Образцы фиброармированных серий обладают большей способностью сохранять сопротивляемость статической нагрузке после воздействия циклов замораживания-оттаивания. Приведены закономерности изменения сопротивляемости фибробетона динамическим (ударным) нагрузкам на вертикальном и маятниковом копрах после воздействия циклов замораживания-оттаивания (ЦЗО). Установлено, что введение в матрицу бетона полипропиленовой фибры ВСМ-6 способно обеспечить существенный прирост вязкости разрушения (сопротивляемости динамической изгибающей нагрузке). Так, после двенадцати циклов энергоёмкость разрушения образцов, содержащих фибру в количестве 1 и 2%, превышает контрольную в $1,9\pm 2,1$ раза. При испытаниях на вертикальном копре введение фибры ВС23–6–61 обеспечивает прирост удельной энергоёмкости разрушения в $1,7\pm 1,8$ раза, кроме того, воздействие пяти циклов не снижает энергоёмкость разрушения фиброармированных образцов. Полученные результаты свидетельствуют, что армирование мелкозернистого бетона короткими базальтовыми и полипропиленовыми волокнами может повышать безопасность труда горнорабочих, а также расширять область применения бетонных конструкций на Севере и рудниках криолитозоны.

Ключевые слова: фибра, базальтовое волокно, полипропиленовое волокно, мелкозернистый бетон, фибробетон, предел прочности при изгибе и сжатии, энергоёмкость разрушения, циклы замораживания-оттаивания.

Для цитирования: 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.

Fine-grained and high-impact fiber-reinforced concrete for application in underground mines in permafrost zone

K. N. Alekseev¹, A. S. Kurilko¹

¹ Institute of Mining of the North named after N.V. Chersky (Siberian Branch of Russian Academy of Sciences), Yakutsk, Russia

Abstract: These studies focus on influence of polypropylene and basalt fibers 10–23 μm in diameter on physical and mechanical properties of fine-grained concrete.

The influence patterns of cyclic freeze–thaw (freezing temperature minus 50±2°C, State Standard GOST 10060-2012) on the bending and compression strength, as well as on the required fracture energy of fiber-reinforced concrete are presented. The optimal content of fiber grades VSM-6 and VS23-6-61 in fine-grained concrete is determined. It is found that addition of basalt fibers in fine-grained concrete increases its cold endurance, since at the fiber content of 2 %, the test samples reach properties of concrete grade F200. The fiber-reinforced concrete samples possess higher statistic loading resistance after cyclic freeze–thaw. The patterns of change in the impact resistance of fiber-reinforced concrete in loading by vertical and pendulum hammering after cyclic freeze–thaw are given. The introduction of polypropylene fiber grade VSM-6 in concrete essentially enhances its fracture toughness (dynamic bending resistance). For instance, after 12 cycles, the required energy of fracture of the concrete samples with fiber contents of 1 and 2 % exceeds the standard fracture energy by 1.9–2.1 times. In vertical hammering tests, the energy required to fracture concrete reinforced with fiber grade VS23-6-61 is increased by 1.7–1.8 times and remains unaltered after 5 cycles. The test results prove that reinforcement of fine-grained concrete with short basalt and polypropylene fibers can improve mining safety and expand application range of concrete structures in underground mines in the permafrost zone and in the Far North.

Key words: fiber, basalt fiber, polypropylene fiber, fine-grained concrete, fiber-reinforced concrete, bending and compression strength limits, required fracture energy, cyclic freeze–thaw.

For citation: Alekseev K. N., Kurilko A. S. Fine-grained and high-impact fiber-reinforced concrete for application in underground mines in permafrost zone. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(12–1):15–28. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_121_0_15.

Введение

В настоящее время всё большее распространение получает подземный способ разработки месторождений полезных ископаемых, расположенных в области криолитозоны. В связи с этим становится актуальным вопрос выбора рациональных, надежных и экономичных способов крепления выработок области многолетнемерзлых пород.

Практика эксплуатации различных бетонных конструкций в условиях рудников криолитозоны свидетельствует, что они испытывают многократное воз-

действие негативных процессов циклического замораживания–оттаивания, а это приводит к снижению их прочности вплоть до саморазрушения [1].

Одним из способов повышения прочностных показателей строительных материалов на цементном вяжущем является введение в смесь волокнистых материалов (фибры) и получения на этой основе дисперсно-армированного композиционного строительного материала. Номенклатура волокон достаточно обширна [2–10], однако за счет высокой прочности

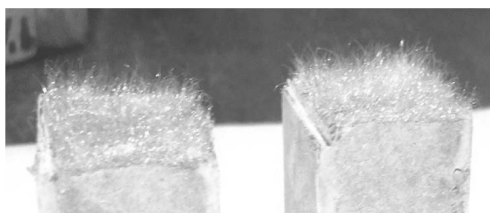


Рис. 1. Волокна полипропиленовой фибры, равномерно распределенные в матрице мелкозернистого бетона

Fig. 1. Polypropylene Fiber Fibers Uniformly distributed in concrete matrix

на растяжение, химической стойкости к щелочной среде цементного теста, а также стоимостных показателей (массовости производства) для применения в гражданском строительстве выделяются базальтовая и полипропиленовая фибра. По своим физико-механическим характеристикам данные типы волокон существенно отличаются (табл. 1). За счет малого диаметра 10–23 мкм они обладают большой удельной поверхностью сцепления с матрицей бетона (рис. 1), что способствует положительным изменениям механических характеристик строительного материала.

Как известно, общим недостатком всех бетонов является склонность к хрупкому разрушению, ГОСТ 10180–2012 устанавливает определение пределов прочности при сжатии и изгибе путем разрушающих статических нагрузок, однако торкрет-бетонные крепи и др. бетонные конструкции, возводимые в шахтах и рудниках, испытывают и динамические воздействия, которые характеризуются более высокой (мгновенной) скоростью выделения энергии. Работоспособность бетона при таких воздействиях можно оценить по характеристикам энергоёмкости разрушения [11–13]. Кроме того, вызывает интерес прогноз изменения энергоёмкости разрушения бетона после воздействия знакопере-

менных температур, который в настоящее время недостаточно изучен.

В связи с вышеописанным были проведены экспериментальные исследования по определению влияния полипропиленовой и базальтовой фибры на прочностные характеристики и энергоёмкость разрушения мелкозернистого бетона после воздействия циклов замораживания-оттаивания.

Методы. 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÷2 кН – 8 Н, в диапазоне 2÷250 кН – 0,5% от измеренной величины). Прочность при изгибе определялась на образцах размерами 40x40x160 мм (1 серия – 3 образца), на половинках образцов-балочек (6 образцов) устанавливали предел прочности при сжатии.

Энергоёмкость разрушения исследуемого геоматериала определялась по ранее разработанной в ИГДС СО РАН методике вертикальном и маятниковом копрах [11–13].

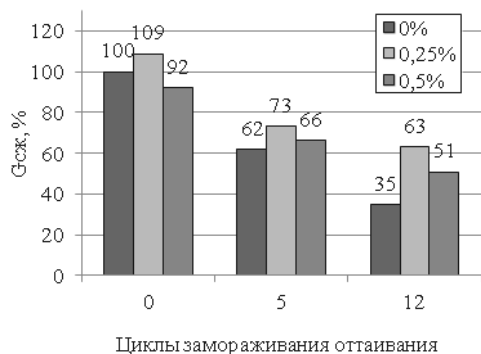
На маятниковом копре БКМ-5–2 определялась вязкость разрушения образцов бетона. Образец исследуемого строительного материала размерами 25x25x100 мм, лежащий на двух опорах, подвергался удару маятника, причем линия удара находилась посередине между опорами. Энергоёмкость разрушения образцов (K_{cu}) определялась как отношение работы (W), затраченной на его разрушение, к площади (S_0) образца в плоскости удара [11]:

$$K_{cu} = W / S_0, \text{ Дж/м}^2 \quad (1)$$

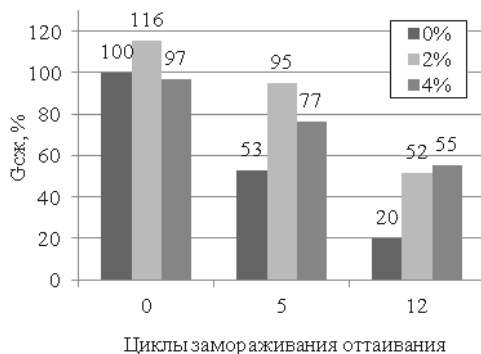
где W – затраты энергии на разрушение образца, Дж; S_0 – площадь обра-

Таблица 1
Физико-технические характеристики фибры
Physics and Technical Specifications Fibra

| Марка | BC23–6-61 | BCM-6 |
|---|----------------------|-----------------------------|
| Геоматериал | Базальт | Полипропилен |
| Длина волокна, мм | 6 | 6 |
| Диаметр волокна, мкм | 23 | 10÷15 |
| Замасливатель | Водная эмульсия № 61 | Присутствует, не маркирован |
| Стойкость к щелочной среде цементного теста [2] | Высокая | Не растворяется |
| Коэффициент удлинения, % [2] | 1,2 – 3,2 | 10 – 25 |
| Прочность на растяжение, МПа [2] | 1900 – 3900 | 150 – 770 |
| Плотность, г/см ³ [2] | 2,6 | 0,91 |



а) Полипропиленовая фибра BCM-6



б) Базальтовая фибра BC23–6-61

Рис. 2. Влияние циклов замораживания-оттаивания на предел прочности на сжатие фибробетона при различном содержании волокна

Fig. 2. Influence of freezing cycles on the ultimate compressive strength of fiber-concrete, with different fiber content

зованной поверхности в месте разлома образца, м².

Испытания на вертикальном копре К. И. Сыскова относятся к объемному разрушению материала. Дроблению подвергали образцы бетона правильной формы размером 24×24×14 мм. Для оценки энергоемкости разрушения бетона заданного состава изготавливали по пять навесок образцов массой около 50 г каждая. Каждую навеску испытываемого материала помещали в грузочный стакан копра и измельчали путем сбрасывания груза массой 2,4 кг

с постоянной высоты 0,6 м. Число сбрасываний груза определялось в соответствии с ГОСТ 21153.1–75 [12].

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±2) °С в среде насыщения.

Материалы, используемые для изготовления образцов:

Таблица 2

Расход компонентов смеси

Consumption of the components of the composition

| Фибра | | Цемент/ Песок | Вода/ Цемент | Расход компонентов смеси, кг/м ³ | | | |
|-------|---------------|------------------|-----------------|---|-------|------|-------|
| % | Марка | | | Цемент | Песок | Вода | Фибра |
| 0 | ВСМ-6 | 1/1 | 0,5 | 792 | 940 | 396 | 0 |
| 0,25 | | | | | | | 4,3 |
| 0,5 | | | | | | | 8,7 |
| 1 | | | | | | | 17,3 |
| 2 | | | | | | | 34,6 |
| 2 | ВС23– 6-61 | | | | | | 34,6 |
| 4 | | | | | | | 69,3 |

Таблица 3

Результаты испытаний образцов фибробетона на установке «UTS – 250»

Test results of fibro-concrete samples on the "UTS – 250" installation

| Фибра | | Количество циклов замораживания-оттаивания | Предел прочности при изгибе | | | Предел прочности при сжатии | | |
|-------|------|--|-----------------------------|-----|-----------------------------------|-----------------------------|-----|-----------------------------------|
| Марка | % | | МПа | % | Коэффициент вариации $V_{m'}$, % | МПа | % | Коэффициент вариации $V_{m'}$, % |
| ВСМ-6 | 0 | 0 | 8,1 | 100 | 1,4 | 32,1 | 100 | 9,4 |
| | | 5 | 2,2 | 27 | 4,9 | 19,8 | 62 | 5,5 |
| | | 12 | 0,8 | 10 | 24,9 | 11,1 | 35 | 5,7 |
| | 0,25 | 0 | 8,1 | 100 | 5,1 | 34,9 | 109 | 2,9 |
| | | 5 | 3,1 | 38 | 3,1 | 23,5 | 73 | 2,5 |
| | | 12 | 2,1 | 26 | 8,2 | 20,3 | 63 | 9,1 |
| | 0,5 | 0 | 7,8 | 96 | 6,5 | 29,6 | 92 | 4,6 |
| | | 5 | 3,7 | 46 | 0,3 | 21,2 | 66 | 9,1 |
| | | 12 | 2,6 | 32 | 11,0 | 16,3 | 51 | 5,3 |
| ВСМ-6 | 0 | 0 | 7,2 | 100 | 5,4 | 41,5 | 100 | 3,4 |
| | | 5 | 3,0 | 41 | 14,5 | 28,1 | 68 | 2,8 |
| | | 12 | 1,6 | 22 | 17,2 | 17,8 | 43 | 20,4 |
| | 1 | 0 | 6,9 | 96 | 4,5 | 35,8 | 86 | 2,9 |
| | | 5 | 4,4 | 61 | 6,6 | 28,3 | 68 | 2,4 |
| | | 12 | 3,6 | 50 | 16,9 | 22,3 | 54 | 5,9 |
| | 2 | 0 | 8,6 | 119 | 17,8 | 30,7 | 74 | 5,4 |
| | | 5 | 4,5 | 63 | 3,1 | 23,8 | 57 | 2,8 |
| | | 12 | 3,9 | 55 | 16,7 | 20,6 | 50 | 2,2 |

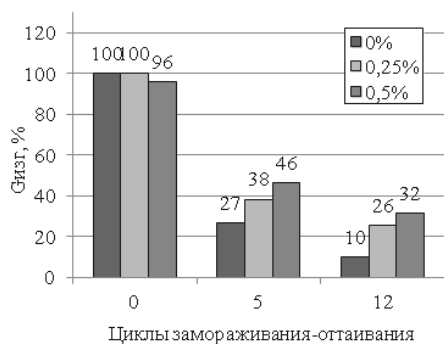
| Фибра | | Количество циклов замораживания-оттаивания | Предел прочности при изгибе | | | Предел прочности при сжатии | | |
|-----------|---|--|-----------------------------|-----|-----------------------------------|-----------------------------|-----|-----------------------------------|
| Марка | % | | МПа | % | Коэффициент вариации V_{m1} , % | МПа | % | Коэффициент вариации V_{m1} , % |
| BC23–6-61 | 0 | 0 | 8,4 | 100 | 6,3 | 31,7 | 100 | 19,9 |
| | | 5 | 2,2 | 27 | 8,4 | 16,7 | 53 | 18,8 |
| | | 12 | 0,3 | 4 | 33,8 | 6,4 | 20 | 35,3 |
| | 2 | 0 | 8,9 | 106 | 12,8 | 36,7 | 116 | 15,1 |
| | | 5 | 5,0 | 60 | 13,3 | 30,1 | 95 | 9,9 |
| | | 12 | 2,5 | 29 | 13,3 | 16,4 | 52 | 13,1 |
| | 4 | 0 | 9,2 | 110 | 4,1 | 30,8 | 97 | 20,4 |
| | | 5 | 5,4 | 65 | 19,9 | 24,3 | 77 | 24,5 |
| | | 12 | 2,1 | 25 | 14,8 | 17,6 | 55 | 22,7 |

Примечание. V_m – коэффициент вариации ГОСТ 18105 – 2018 «Бетоны. Правила контроля и оценки прочности», %.

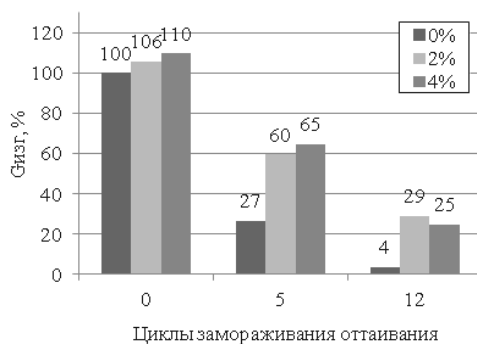
– цемент М400 производства ОАО ПО «ЯКУТЦЕМЕНТ», насыпная плотность 1194 кг/м³, истинная плотность 3121 кг/м³;
 – песок речной, карьер «Пригородный» (г. Якутск), содержание пылевидных и глинистых частиц $P_{отм} = 0,39\%$, насыпная плотность $\rho = 1417,9$ кг/м³, модуль крупности $M_k = 1,2$;

– фибра полипропиленовая марки ВСМ-6;
 – фибра базальтовая марки BC23 – 6-61 (табл. 1).

При изготовлении образцов водоцементное отношение оставалось неизменным. Содержание полипропиленового волокна варьировалось от 0 до 2%,



а) Полипропиленовая фибра ВСМ-6



б) Базальтовая фибра BC23-6-61

Рис. 3. Влияние циклов замораживания-оттаивания на предел прочности при изгибе фибробетона при различном содержании волокна

Fig. 3. Influence of freezing cycles on the flexural strength of fiber-concrete, with different fiber content

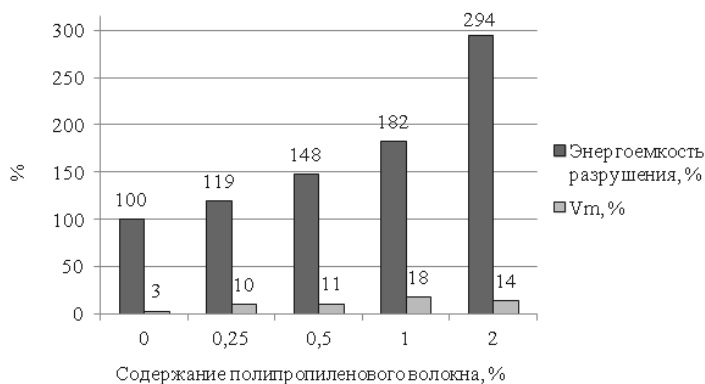


Рис. 4. Влияние полипропиленового волокна на энергоёмкость разрушения бетона
 Fig. 4. The effect of polypropylene fiber on the energy intensity of concrete destruction

базальтового от 0 до 4% [13] от общей массы цемента и песка в сухом состоянии (табл. 2). Компоненты смешивали при помощи миксера. Готовую смесь в формах уплотняли на виброплощадке СМЖ-539. Образцы выдерживали в эксикаторах при 100% влажности среды и температуре 20 ± 1 °С в течение 28 сут.

Результаты проведенных исследований представлены на рис. 2–6 и в табл. 3–5.

Как видно из данных табл. 3, при введении волокна ВСМ-6 в количестве 1 и 2% наблюдается снижение прочности образцов при сжатии на 14 и 26% соответственно, кроме того, данные концентрации не приводят к приросту прочности фибро-армированных образцов после воздействия циклов замораживания-оттаивания. В этой связи была проведена дополнительная серия испытаний с пониженным содержанием полипропиленового волокна 0,25 и 0,5%.

Как видно из данных табл. 3 и диаграмм, представленных на рис. 2, образцы фибро-армированных серий после воздействия знакопеременных температур при любом содержании фибры обладают большей сопротивляемостью статической нагрузке на сжатие.

Оптимальным содержанием для полипропиленового волокна марки ВСМ-6 является 0,25% (рис. 2, а, табл. 3). С увеличением содержания фибры с 1 до 2% (табл. 3.) наблюдается снижение прочности бетона на сжатие с 42 (0%) до 36 и 31 МПа соответственно.

Для базальтовой фибры марки ВС23–6-61 оптимальным содержанием является 2% (рис. 2, б). Кроме того, после воздействия пяти циклов замораживания-оттаивания среднее значение прочности фибро-армированных образцов на 5% ниже контрольной (0%, 0 ЦЗО), что в соответствии с табл. 4 ГОСТ 10060–2012 соответствует марке морозостойкости F200.

Как видно из диаграмм, представленных на рис. 3, и данных табл. 3, прочность мелкозернистого бетона при изгибе незначительно меняется при увеличении содержания фибры. Однако фибро-армированные образцы обладают большей способностью сохранять прочность при изгибе после воздействия знакопеременных температур. Так, прочность образцов дисперсно-армированных базальтовой фиброй после воздействия пяти циклов замораживания-оттаивания в $2,2 \div 2,4$ раза превышает прочность неармированных.

Таблица 4

Результаты испытаний образцов фибробетона на маятниковом копре
 Test results of fiber-concrete samples on a pendulum pile driver

| Марка | Содержание базальтового фибры, % | Количество циклов замораживания-оттаивания | Энергоемкость разрушения | | |
|-------------|----------------------------------|--|--------------------------|-----|--------------------|
| | | | Дж/м ² | % | V _m , % |
| ВСМ-6 | 0 | 0 | 674 | 100 | 9,1 |
| | | 5 | 653 | 97 | 10,0 |
| | | 12 | 587 | 87 | 6,4 |
| | 1 | 0 | 1229 | 182 | 17,7 |
| | | 5 | 1229 | 182 | 17,7 |
| | | 12 | 1299 | 193 | 13,4 |
| | 2 | 0 | 1980 | 294 | 13,7 |
| | | 5 | 1665 | 247 | 12,7 |
| | | 12 | 1387 | 206 | 14,7 |
| ВС23 – 6-61 | 0 | 0 | 634 | 100 | 6,3 |
| | | 5 | 689 | 109 | 9,3 |
| | | 8 | 665 | 105 | 5,6 |
| | 1 | 0 | 676 | 107 | 3,5 |
| | | 5 | 772 | 122 | 6,2 |
| | | 8 | 748 | 118 | 6,1 |
| | 2 | 0 | 705 | 111 | 11,4 |
| | | 5 | 768 | 121 | 9,3 |
| | | 8 | 794 | 125 | 11,0 |
| | 4 | 0 | 750 | 118 | 8,3 |
| | | 5 | 795 | 125 | 9,3 |
| | | 8 | 839 | 132 | 8,9 |

Примечание: V_m — коэффициент вариации ГОСТ 18105 – 2018 «Бетоны. Правила контроля и оценки прочности», %.

Предварительными испытаниями на маятниковом копре установлено (рис. 4), что наибольший прирост вязкости разрушения бетона в 1,8÷2,9 раза наблюдается при содержании фибры ВСМ-6 в количестве 1 и 2% соответственно. Результаты влияния циклов замораживания-оттаивания на сопротивления фибробетона динамической изгибающей нагрузке приведены на рис. 5 и в табл. 4.

При испытаниях на маятниковом копре установлено, что образцы дисперсно-армированных серий в отличие от контрольной (не армированной)

серии при содержании фибры ВСМ-6 в количестве 1 и 2% обладают более высокой сопротивляемостью динамической изгибающей нагрузке в 1,8 и 2,9 раз соответственно (рис. 5, табл. 4).

Воздействие двенадцати циклов замораживания-оттаивания приводит к снижению энергозатрат на разрушение образцов контрольной серии более чем на 5% (на 13%). В то же время, энергозатраты на разрушение образцов, содержащих полипропиленовую фибру в количестве 1 и 2%, по-прежнему существенно превосходят

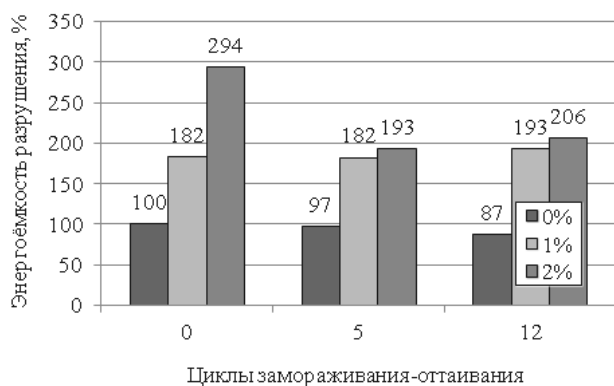


Рис. 5. Влияние циклов замораживания-оттаивания на энергоёмкость разрушения бетона при различном содержании фибры ВСМ-6

Fig. 5. The effect of freezing cycles on the energy intensity of the concrete destruction, at different fiber content VSM-6

Таблица 5

Результаты дробления образцов фибробетона на вертикальном копре
Results Crushing samples Fibro concrete on impact testing machine

| Содержание фибры марки ВС23-6-61, % | Циклы замораживания-оттаивания | Удельная энергоёмкость разрушения | | | Количество сбрасываний | h, мм |
|-------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-----|-------|------------------------|-------|
| | | Дж/м ² | % | Vm, % | | |
| 0 | 0 | 1636 | 100 | 8,8 | 5 | 50 |
| | 5 | 692 | 42 | 10,7 | 4 | 130 |
| | 12 | 397 | 24 | 6,4 | 3 | 185 |
| 1 | 0 | 2789 | 170 | 5,1 | 5 | 29 |
| | 5 | 1558 | 95 | 3,7 | 4 | 53 |
| | 12 | 1030 | 63 | 4,0 | 3 | 66 |
| 2 | 0 | 2936 | 179 | 10,6 | 5 | 27 |
| | 5 | 1939 | 119 | 9,8 | 4 | 38 |
| | 12 | 997 | 61 | 11,6 | 3 | 71 |
| 4 | 0 | 2819 | 172 | 0,8 | 5 | 28 |
| | 5 | 2615 | 160 | 3,9 | 4 | 30 |
| | 12 | 1477 | 90 | 11,4 | 3 | 42 |

Примечание: Vm — коэффициент вариации ГОСТ 18105 — 2018 «Бетоны. Правила контроля и оценки прочности», %; h — высота столба фракции менее 0,5 мм в объёмомере [13], мм.

энергозатраты на разрушение образцов контрольной серии на 93 и 106% соответственно.

Как видно из данных табл. 4, дисперсное армирование образцов бетона базальтовой фиброй не приводит

к существенному росту энергоёмкости разрушения. Кроме того, энергоёмкость разрушения в исследованном диапазоне воздействия циклов замораживания-оттаивания выше, чем в исходном состоянии. По мнению авторов, это

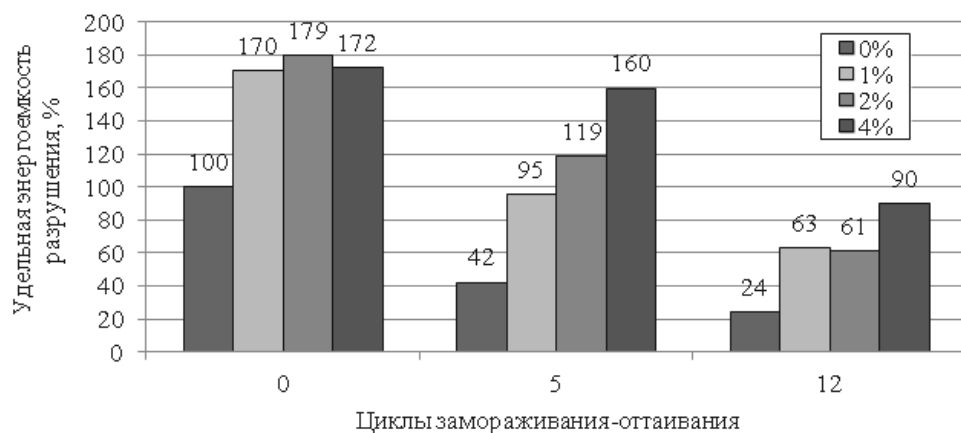


Рис. 6. Влияние знакопеременных температур на удельную энергоёмкость разрушения бетона при различном содержании базальтового волокна
 Fig. 6. Influence of alternating temperatures on the energy intensity of concrete destruction, with different content of basalt fiber

может быть связано с увеличением внутренних дефектов в бетоне, вызванных циклами и рассеиванием энергии удара маятника на рост образовавшихся микротрещин.

Результаты испытаний на вертикальном копре представлены в табл. 5 и в виде диаграмм на рис. 6, установлено, что затраты энергии на дробление образцов бетона повышаются с увеличением содержания базальтовой фибры на 70÷79%. Наиболее ярко эффект армирования фиброй проявляется после воздействия циклов замораживания-оттаивания. Так, удельная энергоёмкость разрушения образцов контрольной не армированной серии после воздействия пяти и двенадцати циклов упала более чем в 2 и 4 раза соответственно. В то же время, после пяти циклов при содержании фибры в количестве 1% энергоёмкость разрушения образцов снизилась на 5% от контрольной, а при содержании в 2 и 4% по-прежнему превосходит затраты на разрушение контрольных образцов.

Расчет удельной энергоёмкости разрушения образцов армированных полипропиленовой фиброй ВСМ-6

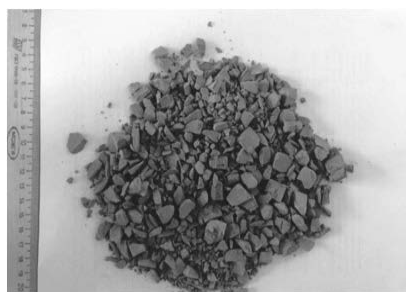
не проводился. После дробления на вертикальном копре образцы фиброармированных серий, в отличие от контрольных и армированных базальтовой фиброй, не разрушились, а покрылись трещинами и деформировались (рис. 7), что сделало невозможным корректно провести гранулометрический анализ. По нашему мнению, это связано с тем, что полипропиленовые волокна, в отличие от базальтовых, обладают более высоким коэффициентом удлинения до 25% (табл. 1).

Необходимо отметить, что, несмотря на невозможность корректно оценить величину удельной энергоёмкости разрушения бетона, армированного полипропиленовой фиброй, она препятствует разрушению исследуемых образцов, что свидетельствует о росте их физико-механических характеристик.

Практическое применение. Возведение фибро-армированных торкрет-бетонных крепей и покрытий в условиях рудников криолитозоны будет способствовать повышению безопасности труда горнорабочих, долговременной устойчивости возведенных



а) Полипропиленовое волокно 1%



б) Дробленный материал

Рис. 7. Состояние исследуемых образцов после дробления на вертикальном копре
Fig. 7. The state of the test samples after crushing on a vertical pile driver

конструкций (безремонтный период), а также расширению их области применения. Кроме того, полученные закономерности могут быть использованы при проектировании составов бетона для возведения в условиях Севера различных бетонных конструкций, обладающих повышенными физико-механическими характеристиками и морозостойкостью.

Направление будущих исследований. Как известно, устойчивость выработок, проведенных в многолетнемерзлых породах, во многом зависит от температурного фактора. Породы, слагающие массив, могут испытывать неблагоприятные процессы оттаивания, попеременного замораживания-оттаивания, морозного пучения, сублимации льда и др. Одним из способов сохранения устойчивости выработок криолитозоны является возведение теплозащитных крепей и покрытий, однако, ввиду низких прочностных показателей, морозостойкости, а также более трудоемкой технологии возведения (на слой прочного конструкционного торкрет-бетона наносится слой теплозащитного) [14], данные крепи широкого распространения не нашли. По нашему мнению, применения фибры в качестве дисперсной фазы в матрице «теплоизоляционного»

бетона способно придать ему характеристики «конструкционного» ГОСТ 25820–2014 и тем самым расширить область его применения.

Заключение

Результаты проведенных исследований свидетельствуют, что базальтовое волокно марки ВС-23–6-61 может быть рекомендовано в качестве добавки, повышающей марку морозостойкости бетона. Так, результаты проведенных исследований свидетельствуют, что введение базальтовой фибры в количестве 2% в матрицу исследуемого состава бетона способно обеспечить марку морозостойкости F200. Сопротивление фибробетона разрушению на вертикальном копре возрастает в $1,7 \div 1,8$ раза, кроме того, воздействие пяти циклов не приводит к снижению энергоемкости разрушения фибро-армированных образцов.

Полипропиленовая фибра марки ВСМ-6 не обеспечивает рост марки морозостойкости исследуемого строительного материала при содержании фибры в диапазоне от 0,25 до 2%. Тем не менее, образцы фибро-армированных серий по-прежнему больше сохраняют способность сопротивляться статической нагрузке после воздействия знакопеременных температур по срав-

нению с образцами контрольных (не армированных) серий.

При испытаниях на маятниковом копре образцы бетона, армированные полипропиленовой фиброй, в отличие от базальтовой, показали существенный прирост сопротивляемости динамической изгибающей нагрузке. Так, после воздействия двенадцати циклов замораживания-оттаивания затраты энергии на разрушение фибро-армированных образцов превышали контрольную в $1,9 \pm 2,1$ раза.

Ввиду различий физико-технических характеристик исследуемые типы волокон оказывают различное влия-

ние на свойства бетонной матрицы, по нашему мнению, полипропиленовое волокно марки ВСМ-6 также может быть рекомендовано в качестве добавки, увеличивающей прочностные характеристики и морозостойкость бетонных конструкций.

Полученные закономерности могут быть использованы при разработке составов бетонов и конструкций из них, более стойких к воздействию ударных нагрузок и знакопеременных температурных воздействий. Например, при строительстве и эксплуатации различных бетонных конструкций в условиях Севера и рудников криолитозоны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dobshits L. M.* Physico-mathematical model of destruction of concrete during cyclic freezing and thawing // *Housing construction*. — 2017. № 12. pp. 30 – 36.
2. *Боровских И. В.* Высокопрочный тонкозернистый базальтофибробетон : дисс. ... канд. техн. наук. — Казань: Казан. гос. архитектур.-строит. ун-т., 2009. — 168 с.
3. *Соловьев В. Г.* Эффективность взаимодействия различных видов фибры с бетонной матрицей / Соловьев В. Г., Бамматов А. А., Кухарь И. Д., Нуртдинов М. Р. // *Наука и бизнес: пути развития*. — 2018. №5. — С. 57 – 61.
4. *Saber Fallah.* Mechanical properties and durability of high-strength concrete containing macro-polymeric and polypropylene fibers with nano-silica and silica fume / Saber F., Mahdi N. // *Construction and Building Materials*. — 2017. Vol. 132. pp. 170 – 187.
5. *Козлов С. Д.* Стеклофибробетон / Козлов С. Д., Матюхина М. А., Абрамов Н. М., Захарченко О. В. // «Инновационные подходы в современной науке» матер. I междунар. науч.-практ. конф. — Москва: Изд-во ООО «Интернаука». — 2017. — С. 9 – 13.
6. *Клюев С. В.* Фибробетон для строительной индустрии / Клюев С. В., Клюев А. В., Ватин Н. И. // *Инженерно-строительный журнал*. — 2018. № 8(84). — С. 41–47. doi: 10.18720/MSE.84.4.
7. *Islam MS.* Influence of jute fiber on concrete properties / Islam MS, Ahmed SJU // *Construction and Building Materials*. — 2018. Vol. 189. pp 768 – 776.
8. *Lee Jong-Han.* Influence of concrete strength combined with fiber content in the residual flexural strengths of fiber reinforced concrete // *Composite Structures*. — 2017. Vol. 168. pp 216 – 225.
9. *Урханова Л. А.* Применение композиционных вяжущих и наномодификаторов для получения фибробетона / Урханова Л. А., Лхасаранов С. А., Буянтуев С. Л., Хардаев П. К. // *Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал*. — 2018. Т. 10. № 6. — С. 91 – 107.
10. *Нажуев М. П.* Эффективность применения различных видов фибры и крупного заполнителя в виброцентрифугированных бетонах / Нажуев М. П., Халюшев А. К., Ткач П. С., Ефимов И. И., Санин И. С., Курбанов Н. С., Орлов М. Г. // *Вестник евразийской науки*. — 2020. Т. 12. № 2. — С. 11.

11. Алексеев К. Н. Влияние базальтового волокна (фибры) на вязкость и энергоёмкость разрушения мелкозернистого бетона / Алексеев К. Н., Курилко А. С., Захаров Е. В. // Горн. Информ.-аналит. Бюллетень. — 2017. №12. — С. 56–63.
12. Захаров Е. В. Влияние знакопеременных температурных воздействий на энергоёмкость процесса дробления горных пород. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Якутск: Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН, 2011. — С. 21.
13. Алексеев К. Н. Влияние циклов замораживания-оттаивания на прочностные характеристики мелкозернистого бетона дисперсно-армированного базальтовой фиброй / Алексеев К. Н., Курилко А. С. // Горн. Информ.-аналит. Бюллетень. — 2018. №11. — С. 56–62.
14. Галкин А. Ф., Киселев В. В., Курилко А. С. Набрызгбетонная теплозащитная крепь. — Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1992. — 164с. **ИТАБ**

REFERENCE

1. Dobshits L. M. Physico-mathematical model of destruction of concrete during cyclic freezing and thawing. *Housing construction*. 2017. no. 12. pp. 30–36.
2. Borovskikh I. V. *Visokoprochniy tonkozernistiy bazaltfibrobeton* [High-strength fine-grained basaltfibrobeton: the Dissertation of the candidate of technical sciences]. Kazan: Kazan State Architectural and Construction University, 2009. 168 p. [In Russ]
3. Soloviev V. G., Bamatov A. A., Kurek I. D., Nurtidinov M. R. *Effektivnost vzaimodeystviya razlichnih vidov fibri s betonnoy matricey* [Efficiency of interaction of various types of fibers with concrete matrix]. *Nauka i biznes: puti razvitiya*. 2018. no. 5. pp. 57–61. [In Russ]
4. Saber F., Mahdi N. Mechanical properties and durability of high-strength concrete containing macro-polymeric and polypropylene fibers with nano-silica and silica fume. *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 132. pp. 170–187.
5. Kozlov S. D., Matyukhina M. A., Abramov N. M., Zakharchenko O. V. *Steklofibrobeton* [Glass fiber reinforced concrete], *Innovatsionnoe podkhody v sovremennoy nauke. Materialy I mezhdunarodnoy nauchnoprakticheskoy konferentsii*. Moscow, Internauka Publ, 2017, pp. 9–13. [In Russ]
6. Klyuev S. V., Klyuev A. V., Vatin N. I. Fibrobeton for the construction industry. *Ingenerno stroitelnyy jurnal*. 2018. no. 8 (84). pp. 41–47. DOI: 10.18720 / MCE.84.4. [In Russ]
7. Islam MS. Influence of jute fiber on concrete properties / Islam MS, Ahmed SJU. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 189. pp 768–776.
8. Lee Jong-Han. Influence of concrete strength combined with fiber content in the residual flexural strengths of fiber reinforced concrete. *Composite Structures*. 2017. Vol. 168. pp 216–225.
9. Urkhanova L. A., Lhasaranov S. A., Buyanutuev S. L., Hardaev P. K. The use of composite binders and nanomodifiers for obtaining fibrobeton. *Nanotechnologii v stroitelstve: nauchnyy internet jurnal*. 2018. Vol. 10. no. 6. pp. 91–107. [In Russ]
10. Nazhuev M. P., Khalyushev A. K., Tkach P. S., Efimov I. I., Sanin I. S., Kurbanov N. S., Orlov M. G. Efficiency of applying various types of fiber and large aggregate in vibration-centrifuged concrete. *Vestnik evraziyskoy nauki*. 2020. T. 12. No. 2. P. 11. [In Russ]
11. Alekseev K. N., Kurilko A. S., Zakharov E. V. Effect of basalt fiber (fibra) on viscosity and energy intensity of destruction of fine-grained concrete. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017. no. 12. pp. 56–63. [In Russ]
12. Zakharov E. V. *Vliyanie znakoperemennih temperaturnih vozdeystviy na energoemkost processa drobleniya gornih porod* [The effect of alternating temperature effects on the energy intensity of the process of crushing rocks. Author's abstract of the dissertation of the candidate of technical sciences]. *Yakutsk: Institut gornogo dela Severa im. N. V. Cherskogo SO RAN*, 2011. P. 21. [In Russ]

13. Alekseev K. N., Kurilko A. S. Effect of freeze-thaw cycles on the strength characteristics of fine-grained concrete reinforced with basalt fiber. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018. no. 11. pp. 56–62. [In Russ]

14. Galkin A. F., Kiselev V. V., Kurilko A. S. *Nabrizgbetonnaya teplozashitnaya krep* [Sprinkle-concrete heat-protective fastener]. Yakutsk: YNC SO RAN, 1992. 164 p. [In Russ]

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Алексеев Константин Николаевич*¹ – мл. науч. сотр., const1711@mail.ru;

*Курилко Александр Сардокович*¹ – докт. техн. наук, профессор, зав. лабораторией горной теплофизики;

¹ Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», 677980, г. Якутск, пр. Ленина, 43.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Alekseev K. N.*¹, Junior Researcher, const1711@mail.ru;

*Kurilko A. S.*¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of mountain thermal physics laboratory;

¹ Institute of Mining of the North named after N.V. Chersky (Siberian Branch of Russian Academy of Sciences), Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, Lenina ave., 43, 677980, Russia.

Получена редакцией 18.07.2021; получена после рецензии 29.10.2021; принята к печати 10.11.2021.

Received by the editors 18.07.2021; received after the review 29.10.2021; accepted for printing 10.11.2021.

