

## СТАТЬИ

УДК 55:622.273.218

**ВЛИЯНИЕ ПОЛИПРОПИЛЕНОВОЙ ФИБРЫ  
НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА  
ЛЬДОПОРОДНЫХ ЗАКЛАДОЧНЫХ СМЕСЕЙ****Алексеев К.Н., Петров Д.Н.***ФГБУН Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения  
Российской академии наук, Якутск, e-mail: const1711@mail.ru*

В статье приведены результаты экспериментальных исследований по определению прочности образцов льдопородной закладки на сжатие в зависимости от содержания воды и коротких полипропиленовых волокон диаметром 10÷15 мкм. Промораживание и испытание исследуемых образцов проводились при температуре -20 °С. Установлено оптимальное содержание фибры для льдопородной закладки из дробленого алевролита с золотосодержащим месторождения «Бадран». Наибольший прирост прочности льдопородных образцов на 38% с 8,7 до 12 МПа достигается при объемном содержании фибры  $\mu \approx 0,5\%$  (4,35 кг/м<sup>3</sup>). При содержании фибры от 4,35÷17,4 кг/м<sup>3</sup> ( $\mu = 0,5\pm 2\%$ ) прочность исследуемых образцов варьируется в пределах от 12 до 10,4 МПа. Дальнейшее увеличение содержания фибры до 34,8 кг/м<sup>3</sup> ( $\approx 4\%$ ) приводит к снижению плотности исследуемых образцов с 1763 до 1476 кг/м<sup>3</sup> и прочности до 5,8 МПа. В условиях неполного водонасыщения при объемном содержании воды в 15 и 30% введение фибры в состав льдопородной закладки не приводит к росту прочности. Исследуемые образцы разрушались в части, где количество льда-цемента было наименьшим. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о наличии технической возможности повышения прочности льдопородного закладочного материала путем введения в состав смеси хаотично ориентированных микроармирующих волокон. Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности повышения прочности целиков из льдопородной закладки без существенного изменения апробированной технологии, при минимальных дополнительных затратах. Полученные результаты исследований рекомендуются для использования при формировании закладки из промораживаемых пород в натуральных условиях и расчетах конструктивных параметров систем разработки с применением смерзающей закладки.

**Ключевые слова:** лед, льдопородная закладка, полипропиленовая фибра, криолитозона, шахты и рудники Севера, прочность на сжатие

*Лабораторные исследования проводились на оборудовании ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН (грант № 13.ЦКП.21.0016).*

**INFLUENCE OF POLYPROPYLENE FIBER  
ON THE STRENGTH PROPERTIES OF ICE-ROCK STACKING MIX****Alekseev K.N., Petrov D.N.***Institute of Mining of the North named after N.V. Chersky of the Siberian Branch  
of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, e-mail: const1711@mail.ru*

The article presents the results of experimental studies to determine the compressive strength of samples of ice-rock backfill depending on the content of water and short polypropylene fibers with a diameter of 10÷15 micrometers. Freezing and testing of the studied samples were carried out at a temperature of -20°C. The optimal content of fiber for ice-rock filling from crushed siltstone from "Badran" gold deposit has been established. The greatest increase in the strength of ice samples by 38% from 8.7 to 12 MPa is achieved with a fiber volume content  $\mu \approx 0.5\%$  (4.35 kg/m<sup>3</sup>). When the fiber content is from 4.35÷17.4 kg/m<sup>3</sup> ( $\mu = 0.5\pm 2\%$ ), the strength of the studied samples varies from 12 to 10.4 MPa. A further increase in the fiber content to 34.8 kg/m<sup>3</sup> ( $\approx 4\%$ ) leads to a decrease in the density of the studied samples from 1763 to 1476 kg/m<sup>3</sup> and strength to 5.8 MPa. Under conditions of incomplete water saturation with a volumetric water content of 15 and 30%, the introduction of fiber into the composition of the ice backfill does not lead to an increase in strength. The studied samples were destroyed in the part where the amount of ice-cement was the smallest. The results of the studies carried out indicate that it is technically possible to increase the strength of the ice-rock filling material by introducing randomly oriented micro-reinforcing fibers into the composition of the mix. The practical significance of the results obtained lies in the possibility of increasing the strength of the pillars from the ice-rock backfill without a significant change in the proven technology, at minimal additional costs. The obtained research results are recommended for use in the formation of backfill from frozen rocks in natural conditions and in the calculation of design parameters of development systems using frozen backfill.

**Keywords:** ice, ice-rock backfill, polypropylene fiber, permafrost zone, mines and mines of the North, compressive strength

Применение промораживаемых водородных смесей в качестве закладочного материала при разработке ряда рудных месторождений криолитозоны в нашей стране и за рубежом показало эффективность данного вида закладки [1–3].

В ИГДС СО РАН была разработана и внедрена в промышленных масштабах камерная система разработки с использованием льдопородной закладки при разработке золоторудного месторождения «Бадран», что позволило достичь высоких показате-

лей извлечения ценной руды (потери 1–3%). Исследования позволили установить влияние на прочность льдопородной закладки технологии ее возведения, конструктивных параметров, состава и температуры очистного пространства. По результатам исследований, с учетом опыта применения данной технологии на рудной шахте «Бадран», были разработаны рекомендации по повышению эффективности применения смерзающей закладки [4; 5].

Технология подземной добычи руды с использованием льдопородной закладки является весьма перспективной, например, при отработке малообъемных рудных тел, отдельных участков рудных залежей, возведения предохранительных целиков и искусственных потолочин при освоении месторождений, расположенных в зоне распространения многолетней мерзлоты [6]. В связи с вышеизложенным исследования, направленные на повышение прочностных характеристик смерзающихся водопородных смесей, весьма актуальны.

Известным способом повышения прочности льда является введение в его матрицу различных наполнителей, например в виде коротких волокон, и получения на этой основе композиционного материала [7–9]. Номенклатура применяемых волокон весьма обширна, от искусственных: базальтовых, стеклянных, углеродных и др. [9, с. 106; 10] – до наполнителей природного происхождения: древес-

ные волокна, хлопок, сено, лен, хвоя и др. [11; 12]. В конструкционном отношении волокна природного происхождения уступают искусственным, которые, при равном коэффициенте армирования за счет малого диаметра в 10–20 мкм, обладают гораздо большей удельной поверхностью сцепления с армируемой матрицей (льдом) [13, с. 4].

В работах [11; 14] приведены результаты исследования механических свойств фиброармированных слоистых льдокомпозиатов на трехточечный изгиб, которые свидетельствуют о рациональности их применения для строительства ледовых переправ, ледяных аэродромов, зимних дорог и т.п. [11; 15]. Необходимо отметить, что применение в данной сфере химически стойких или инертных искусственных волокон ведет к повышению техногенной нагрузки на окружающую среду.

На первом этапе было исследовано влияние содержания полипропиленовой фибры на прочность льда при сжатии в зависимости от температурных условий. Результаты экспериментов показали, что введение полипропиленовой фибры в матрицу льда способно повысить его прочность на сжатие (рис. 1). При температуре -10 °С с увеличением содержания фибры прочность микроармированного льда возрастает примерно в 9 раз, с 0,9 до 8,1 МПа, а с ее понижением до рекомендованных температур формирования целика [4] в -20 °С прочность льдокомпозиата увеличивается с 2,5 до ≈14 МПа.

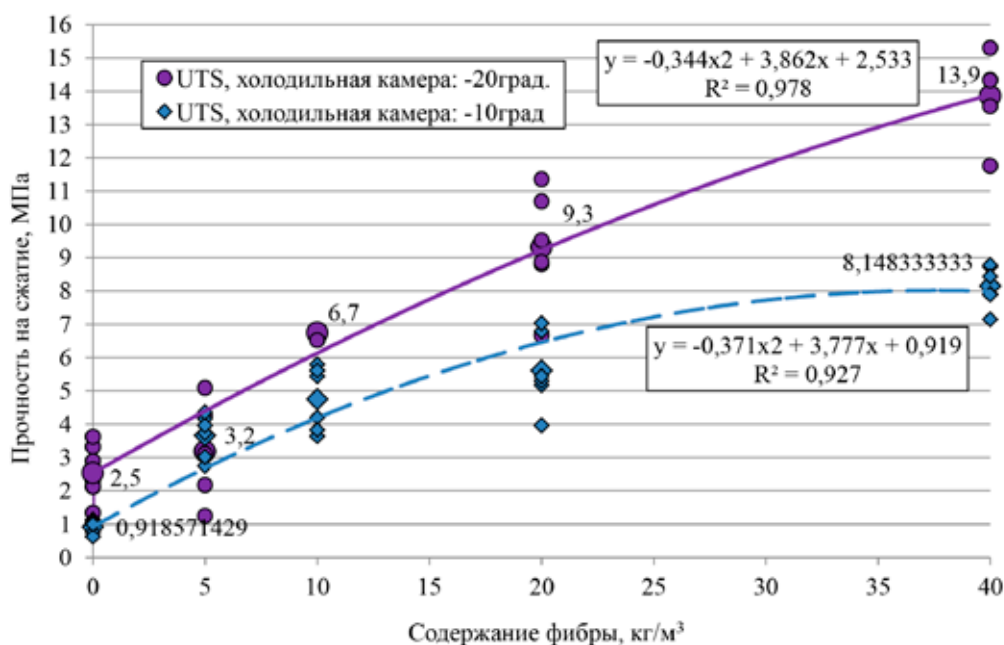


Рис. 1. Влияние содержания полипропиленовой фибры ВСМ-6 на прочность льда при сжатии в зависимости от температурных условий

Полученный материал по своим прочностным характеристикам вполне удовлетворяет требованиям, предъявляемым к смерзающим закладочным массивам. Однако в реальных условиях подземной разработки месторождений не может быть воспроизведен в масштабах, необходимых для эффективного применения в качестве искусственных целиков, вследствие длительности возведения ледяной закладки, промораживание необходимого объема которой может занимать годы [16]; кроме того, необходимо учесть дополнительные затраты на возведение и поддержание гидроизоляции в условиях отрицательных температур подземной разработки. Использование полипропиленовой фибры в льдопородном закладочном массиве позволит добиться ее равномерного распределения и повышения прочностных характеристик искусственных целиков без применения дополнительных мероприятий при их возведении.

Цель исследования заключается в экспериментальной оценке влияния полипропиленовой фибры диаметром  $10 \div 20$  мкм на прочность льдопородной закладки различного гранулометрического состава.

#### Материалы и методы исследования

Льдопородные образцы кубической формы размерами  $100 \times 100$  мм изготавливали путем замораживания смесей из дробленых пород, воды и фибры в климатической камере ТСС 7160 при рекомендованной температуре промораживания [4] в  $-20$  °С, с использованием следующих материалов:

– дробленый алевролит с золотоносного месторождения «Бадран» РС (Я), насыпная плотность  $1370$  кг/м<sup>3</sup>, гранулометрический состав (табл. 1) соответствовал ранее проведенным ИГДС СО РАН экспериментам [5];

Таблица 1

Гранулометрический состав дробленого алевролита

Размер отверстий сит, мм	Частный остаток, %
5	25÷30
5÷10	40÷45
10÷15	15÷20
15	5÷10

– фибра полипропиленовая марки ВСМ-6, длина волокна 6 мм, диаметр  $10 \div 15$  мкм, плотность  $910$  кг/м<sup>3</sup> [13, с. 16].

– вода с максимальным содержанием солей не более  $500$  мг/л.

В ходе экспериментальных исследований в соответствии с ГОСТ 10180-2012, 18105-2018 определялась прочность образцов льдопородной закладки на одноосное сжатие. Испытания образцов проводились в термокамере, при температуре  $-20$  °С [5], на установке UTS250 (погрешность измерения в диапазоне  $0,8 \div 2$  Кн –  $8$  Н, в диапазоне  $2 \div 250$  кН –  $0,5$  % от измеренной величины).

#### Результаты исследования и их обсуждение

Были проведены три серии испытаний на образцах из хаотично микроармированного дробленого алевролита с различным объемом содержания воды: максимальное  $43,5$  %, оптимальное  $30$  % и минимальное  $15$  % [4].

Результаты проведенных исследований представлены на рис. 2 и в табл. 2.

Установлено, что в условиях полного водонасыщения ( $43,5$  %) при содержании фибры от  $0$  до  $8,7$  кг/м<sup>3</sup> ( $\mu = 0 \div 1$  %) находится оптимальное содержание волокна для льдопородной закладки из дробленого алевролита. Наибольшее увеличение прочности на  $38$  % с  $8,7$  до  $12$  МПа достигается при содержании фибры в количестве  $4,35$  кг/м<sup>3</sup> ( $\mu = 0,5$  %). При содержании фибры в диапазоне от  $4,35$  до  $17,4$  кг/м<sup>3</sup> ( $\mu = 0,5 \div 2$ ) прочность фиброармированных льдопородных образцов превышает контрольную и варьируется в пределах от  $12$  до  $10,4$  МПа. При увеличении содержания волокна до  $38,4$  кг/м<sup>3</sup> ( $\mu = 4$  %) плотность исследуемых образцов снижается с  $1763$  до  $1476$  кг/м<sup>3</sup> (табл. 2), а прочность падает до  $5,8$  МПа.

Как видно из данных табл. 2, в условиях неполного водонасыщения (при содержании воды в  $15$  и  $30$  %) введение фибры в состав льдопородной закладки не приводит к росту прочности. Исследуемые образцы разрушались в части, где количество льда-цемента было наименьшим, где вода не полностью заполнила пустоты между кусками дробленых пород (рис. 3).

Необходимо отметить, что приведенные результаты справедливы лишь для вышеприведенных условий проведения экспериментов. При ведении закладочных работ в конкретных производственных условиях для получения целиков требуемой несущей способности необходимо учитывать зависимость прочности льдопородного материала от определенных термовлажностных условий формирования [5].

Таблица 2

Физико-технические характеристики образцов льдопородной закладки

Материал	Масса, кг/м <sup>3</sup>		Фибра		Плотность		Прочность на сжатие		Sm, МПа	Vm, %
	Заполнитель	Вода	Объемное содержание $\mu$ , %	кг/м <sup>3</sup>	кг/м <sup>3</sup>	%	МПа	%		
Дробленый алевролит	1370	435 (максимальное содержание)	0	0	1763	100	8,7	100	0,6	7,2
			0,5	4,35	1752	101	12,0	138	0,2	1,3
			1	8,7	1788	103	11,2	129	0,3	3,0
			2	17,4	1784	103	10,4	119	0,8	7,3
			4	34,8	1476	85	5,8	67	0,04	0,6
		300 (оптимальное содержание [4])	0	0	1672	100	4,1	100	0,9	21,0
			0,5	4,35	1700	102	4,5	110	1,0	23,2
			1	8,7	1674	100	3,3	80	0,5	16,2
			1,9	17,4	1685	101	4,0	98	0,5	13,0
			3,8	34,8	1675	100	4,3	103	0,5	10,8
		150 (минимальное содержание [4])	0	0	1596	100	1,6	100	0,6	38
			0,5	4,35	1545	97	1,4	90	0,5	37
	1		8,7	1530	96	1,6	104	0,1	4	
	1,9		17,4	1534	96	1,7	109	0,5	29	
	3,8		34,8	1544	97	2,38	151	0,6	25	

Sm – среднеквадратическое отклонение, МПа; Vm – коэффициент вариации, %.

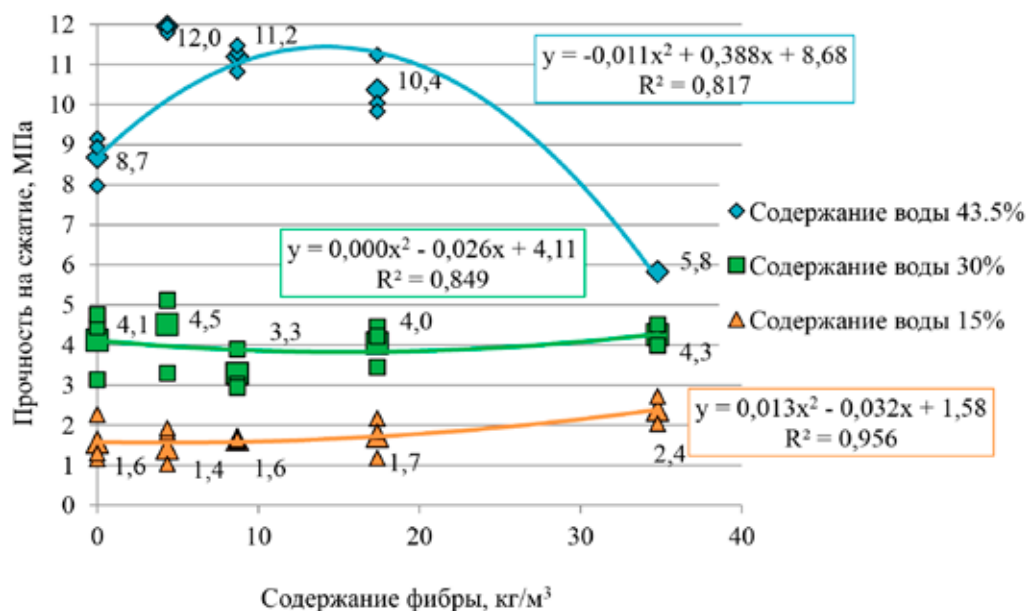


Рис. 2. Прочность образцов льдопороды на сжатие при различном содержании воды и полипропиленовых волокон



Рис. 3. Образец льдопородной закладки  $\mu_{\text{воды}} = 30\%$  с отчетливой границей водонасыщения/недостаток льда-цемента

### Заключение

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о наличии технической возможности повышения прочности льдопородного закладочного материала путем введения в состав смеси микроармирующих полипропиленовых волокон. Установлено оптимальное содержание армирующего волокна ( $\mu \in [0;1]\%$ ) для закладки на основе алевролитового щебня, позволяющее повысить прочность на сжатие образцов льдопородной закладки на 38% с 8,7 до 12 МПа при  $\mu = 0,5\%$ .

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности повышения прочности целиков из льдопородной закладки без существенного изменения апробированной технологии, при минимальных дополнительных затратах.

Необходимо отметить, что возведение фиброармированных ледяных или льдопородных закладочных массивов, целиков, могильников токсичных отходов в области рудников криолитозоны не ведет к повышению техногенной нагрузки. Более того, может способствовать ее снижению путем частичной утилизации отвалов, хвостов обогащения горно-обогатительного предприятия, используя их в качестве наполнителя при изготовлении льдопородной закладки.

Полученные результаты исследований рекомендуются для использования при формировании закладки из промораживаемых пород в натуральных условиях и расчетах конструктивных параметров систем разработки с применением смерзающей закладки.

### Список литературы

1. Kight G., Harris M., Gorski B., Udd J.E. Frozen backfill research for Canadian mines. Canada Centre for Mineral and Energy Technology. 1994. 21 p.
2. Киселев В.В., Хохолов Ю.А. Экогеотехнологический способ подземной отработки техногенных россыпных месторождений криолитозоны // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. № 3. С. 29–33.
3. Cluff D.L., Kazakidis V.N. Opportunities and Constraints of Engineering Frozen Backfill for Underground Mining Applications in Permafrost. ISCORD: Planning for Sustainable Cold Regions. Proceedings of the 10th International Symposium on Cold Regions Development. 2013. P. 175–190.
4. Петров Д.Н., Хохолов Ю.А. Прогноз продолжительности формирования льдопородного целика в зависимости от горно-геологических условий, температуры промораживания и конструктивных параметров // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. № 10. С. 24–29.
5. Зубков В.П., Необутов Г.П., Петров Д.Н. Повышение плотности и качества извлечения запасов при подземной разработке золоторудных месторождений Республики Саха (Якутия) // Горный журнал. 2017. № 4. С. 53–56.
6. Необутов Г.П., Зубков В.П., Мамонов А.Ф. Подземная добыча руды с использованием льдопородной закладки на месторождении Бадран в Якутии // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2001. № 10. С. 71–74.
7. Васильев Н.К., Пронк А.Д.С. Ледяные и льдогрунтовые композиты как строительные материалы в ледяных сооружениях // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. 2015. Т. 277. С. 35–45.
8. Buznik V.M., Goncharova G.Y., Grinevich D.V., Nuzhny G.A., Razomasov N.D., Turalin D.O. Strengthening of ice with basalt materials. Cold Regions Science and Technology. 2022. Vol. 196. P. 103490.
9. Райс В.В. Определение параметров технологии с замораживаемой закладкой выработанного пространства при отработке ценных руд жильных месторождений в криолитозоне: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2019. 216 с.
10. Бузник В.М., Василевич Н.И. Материалы для освоения арктических территорий – вызовы и решения // Лаборатория и производство. 2020. № 1 (11). С. 98–107.
11. Сыромятникова А.С., Федорова Л.К. Перспективы применения ледяных композиционных материалов для строительства ледовых переправ // Арктика: экология и экономика. 2022. № 2. С. 281–287.
12. Wu Y., Lou X., Liu X., Pronk A. The property of fiber reinforced ice under uniaxial compression. Materials and Structures. 2020. № 2. P. 29.
13. Боровских И.В. Высокопрочный тонкозернистый базальтофибробетон: дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2009. 168 с.
14. Нужный Г.А., Бузник В.М., Черепанин Р.Н., Гончарова Г.Ю., Разомасов Н.Д. Создание и исследование композиционных материалов на основе льда // Полярная механика. 2018. № 4. С. 22–29.
15. Васильев Н.К., Шаталина И.Н. Методы армирования льда для создания ледяных и льдогрунтовых композитов // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. 2011. Т. 264. С. 119–129.
16. Шерстов В.А., Хохолов Ю.А., Ушницкий И.М., Елшин В.К., Киселев В.В. Влияние нерегулируемого теплового режима на условия эксплуатации россыпных шахт Севера // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. Отдельный выпуск № 3. С. 136–137.