

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕНТНОГО СОДЕРЖАНИЯ ВКЛЮЧЕНИЙ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЗОРВАННОГО МАССИВА МЕРЗЛЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

*Алькова Е.Л., Панишев С.В., Максимов М.С.*

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

**Ключевые слова:** смерзание, прочность на срез, вскрышные породы, включения, мерзлые породы, лабораторные исследования.

**Аннотация.** Статья посвящена изучению механических свойств мерзлых пород и их влияния на прочность. В работе представлен анализ серии лабораторных испытаний образцов смерзшихся взорванных многолетнемерзлых пород с использованием сконструированного стенда для определения прочности на срез. Были использованы образцы породы, полученные путем перемешивания песчаника мелко и среднезернистого с добавлением включений различного диаметра и процентного количества. В ходе исследований при различных комбинациях исходных параметров было показано, что основными факторами, влияющими на прочность мерзлых пород, являются влажность, грансостав, температура смерзания и плотность упаковки. Также в статье показано, что при изменении количества включений в процентном отношении происходит изменение прочности смерзшихся образцов. По отношению к однородным образцам наблюдается некоторое увеличение прочности при минимальных значениях влажности и температуры. При дальнейшем увеличении процентного соотношения включений в связующее идет снижение прочности. Полученные результаты позволяют правильно оценивать прочностные свойства вторично смерзшихся пород.

## RESEARCH OF THE INFLUENCE OF THE PERCENTAGE CONTENT OF INCLUSIONS ON THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF EXPLODED ARRAY OF FROZEN ROCKS

*Alkova E.L., Panishev S.V., Maksimov M.S.*

*Mining Institute of the North n.a. N.V. Cherskiy of Siberian Branch  
of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk*

**Keywords:** freezing, shear strength, overburden rocks, inclusions, frozen rocks, laboratory studies.

**Abstract.** The article is devoted to the study of the mechanical properties of frozen rocks and their influence on strength. The paper presents an analysis of a series of laboratory tests of frozen blasted permafrost samples using a constructed stand to determine shear strength. Rock samples were used obtained by mixing fine and medium-grained sandstone with the addition of inclusions of various diameters and percentages. In the course of studies with various combinations of initial parameters, it was shown that the main factors affecting the strength of frozen rocks are humidity, granular composition, freezing temperature and packing density. The article also shows that when the number of inclusions changes in percentage terms, the strength of the frozen samples changes. In relation to homogeneous samples, a slight increase in strength is observed at minimum values of humidity and temperature. With a further increase in the percentage of inclusions in the binder, the strength decreases. The results obtained allow us to correctly assess the strength properties of re-frozen rocks.

### Введение

В условиях месторождений криолитозоны разработка мерзлых горных пород практически невозможна без предварительной буровзрывной подготовки. При этом, кусковатость взорванных пород должна быть оптимальной, то есть, обеспечивать максимальную производительность выемочного оборудования при минимальных затратах на буровзрывную подготовку. В условиях экскавации взорванного массива пород склонного к повторному смерзанию, производительность такого оборудования как экскаватор-драглайн зависит не только от размера куска, но и от температурного режима породы в забое, влияющего на прочностные характеристики взорванной горной массы. Основные

исследования прочностных характеристик грунтов, которые встречаются в научном сообществе, посвящены решению инженерных задач в таких отраслях, как строительство, горная промышленность. При разработке полезных ископаемых решаются задачи устойчивости бортов отвалов, откосов уступов и бортов карьеров. Исследования проводятся как в России, так и за рубежом [1-4]. В научно-технической литературе отсутствуют данные о том, как изменяются прочностные характеристики взорванного смерзающегося массива многолетнемерзлых горных пород от температуры, влажности, размера среднего куска, и процентного содержания кусковой фракции поддающейся учету относительно мелкой измельченной взрывными работами фракции. Исследованию этого вопроса и посвящена данная работа.

### Материалы и методы исследования

В задачу проведенных исследований входило изучение влияния различного содержания включений на прочностные свойства смерзающегося взорванного массива, в частности исследовалась прочность на срез. Сложность эксперимента заключается в многокомпонентности исследований, в котором учитывались различные значения температуры, влажности, уплотнения, диаметр и процентного количества включений.

Лабораторные исследования проводились по авторской методике [5] на специализированном стенде для определения прочности на срез на образцах, структурно сопоставимых с взорванным смерзшимся массивом [6] (рис. 1).

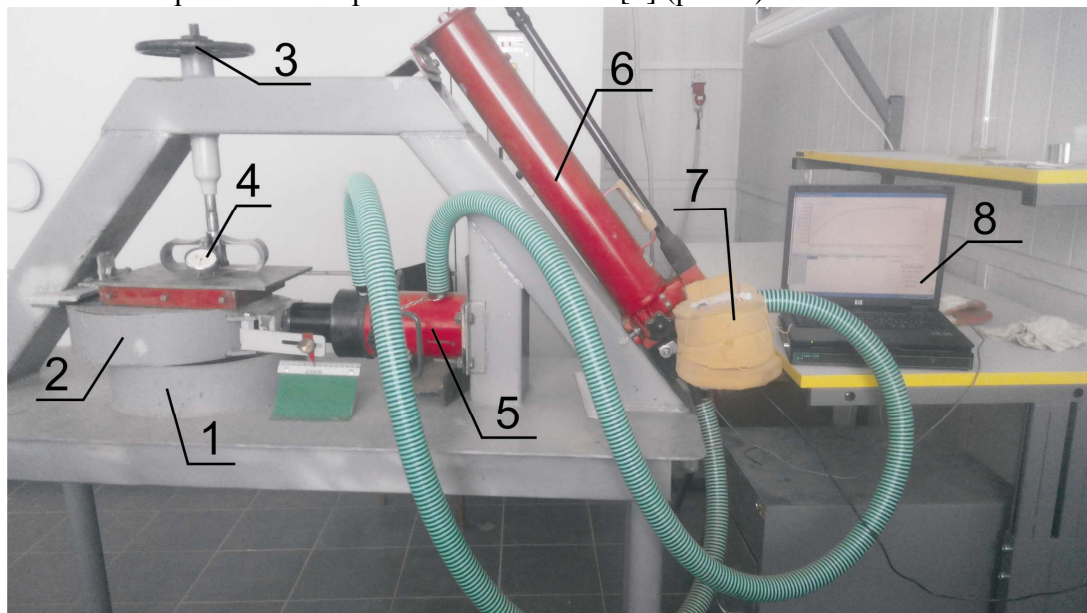


Рис. 1. Стенд для испытания смерзшихся вскрышных пород на срез: 1, 2 – неподвижная и подвижная обоймы срезной коробки, 3 – регулировочный винт, 4 – динамометр, 5 – гидравлический домкрат, 6 – ручной насос, 7 – цифровой манометр, 8 – измерительный комплекс «Мера»

Проведение исследования начиналось с подготовки образцов с разным процентным содержанием включений, различной влажностью, температурой и плотностью упаковки. Опытные образцы для испытаний формировались в отдельной емкости путем перемешивания песка, выступающего связующим, и включений, и уже далее укладывались в кольца диаметром 350 мм и высотой 175 мм. Следует отметить, что образец не имеет плоскости смерзания, т.е. образец цельный.

Первый вариант образцов – песчаная матрица с 50% включений, диаметром 40 мм, температурой смерзания  $-15^{\circ}\text{C}$ , влажностью 15%.

Второй вариант – 50% включений диаметром 40 мм, температура смерзания  $-5^{\circ}\text{C}$ , влажность породы 10%. Меньшую влажность породы не рассматривали, так как предыдущими исследованиями [7] установлено, что при 5% влажности образец не смерзается.

Третий вариант – песчаная матрица с 70% включений, диаметром 40 мм, температурой смерзания  $-15^{\circ}\text{C}$ , влажностью 15%.

Четвертый вариант – 70% включений диаметром 40 мм, температура смерзания  $-5^{\circ}\text{C}$ , влажность породы 10%.

Пятый – восьмой варианты испытательных образцов аналогичны первым четырем, но с диаметром включений 50 мм.

Испытания проводились на срез (сдвиг), чтоб оценить прочностные характеристики каждого образца. Все образцы исследовались при различном уплотнении, так как разрушенная порода в развале с глубиной испытывает нагрузку вышележащих слоев. Поэтому неуплотненные образцы соответствуют верхней части развала, уплотненные нагрузкой в 1,6 МПа соответствуют породе на глубине 10 м и 3,1 МПа соответствуют давлению породы в развале на глубине 20 м по высоте соответственно.

**Цель** настоящего этапа исследований состояла в установлении зависимостей между параметрами прочности на срез и процентным содержанием включений, так как изменение содержания включений влияет на прочностные характеристики породы под воздействием нагрузок.

Необходимо уточнить, что включения представляют из себя смороженные кубики из того же геоматериала, что и само связующее, песчаник мелко- и среднезернистый.

Анализ полученных данных показал, что для образцов нарушенной структуры характер изменения предела прочности на срез носит однотипный характер (рис. 2, 3) при различном диаметре включений и температурно-влажностном состоянии взорванного массива.

При добавлении в однородный неуплотненный образец 50% включений происходит возрастание предела прочности в 3 раза, при дальнейшем увеличении содержания включений прочность на срез уменьшается. В уплотненных образцах прочность на срез в среднем снижается в 1,1-1,3 раза в зависимости от температуры, влажности пород и плотности упаковки.

Так для образцов с включениями 50 мм, температурой смерзания  $-15$  градусов и влажностью 15% прочность на срез при увеличении процентного содержания включений с 50 до 70% снижается в 1,47 раз в образце без уплотнения; в 1,57 раз при уплотнении нагрузкой в 1,6 МПа и в 1,5 раз при уплотнении в 3,1 МПа. Аналогичная картина снижения прочности наблюдается и при наличии включений диаметром 40 мм. В образцах без уплотнения снижение составляет 1,4 раза, при дальнейшем уплотнении образцов и увеличении количества включений, снижение происходит в 1,3 раза (рис. 2).

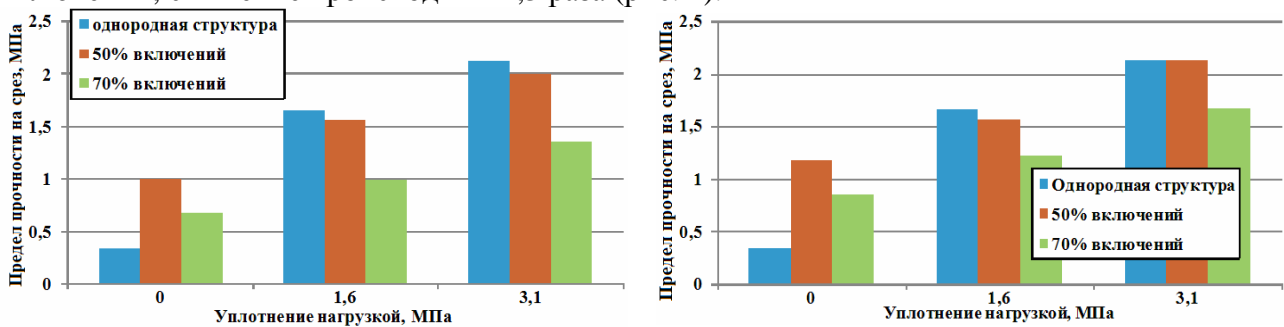


Рис. 2. Изменение предела прочности на срез в зависимости от процентного содержания включений в образце при температуре  $-15$  град и влажности 15% (При куске, диаметром 50 мм слева и 40 мм, справа)

Исследование образцов, смороженных при температуре  $-5$  градусов и влажности породы 10% что при диаметре включений 40 мм, что при диаметре 50 мм картина снижения прочности на срез при увеличении процентного содержания включений схожая. У неуплотненного образца с включениями 50 мм не происходит снижения прочности с увеличением процентного содержания, в образце с включениями 40 мм снижение составляет 1,2 раза. При дальнейшем уплотнении образцов происходит снижение прочности в 1,4 раза

при плотности упаковки 1,6 МПа и в 1,1 раза при плотности упаковки в 3,1 МПа одинаково при размере включений 50 и 40 мм (рис. 3).

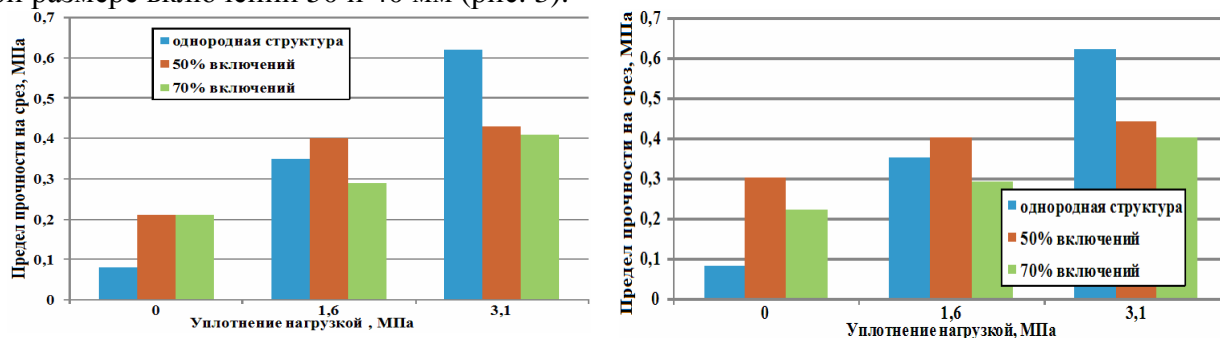


Рис. 3. Изменение предела прочности на срез в зависимости от процентного содержания включений в образце при температуре -5 град и влажности 10% (При куске, диаметром 50 мм слева и 40 мм, справа)

Установленные зависимости прочности разрушенных смерзшихся пород от процентного соотношения мелкой однородной фракции и кусковой хорошо коррелируются с исследованиями ученых [8, 9] на других геокомпозитах.

Полученные результаты послужили основой для расчета относительного показателя трудности экскавации по формулам, предложенным академиком Ржевским В.В. [10]. Данные представлены в таблице 1.

Интерпретация полученных значений позволяет установить, что показатель трудности экскавации с увеличением количества включений снижается, в среднем в 1,1 раза.

Табл. 1. Значения показателя трудности экскавации при различном состоянии разрабатываемых пород

Температура, влажность	Уплотнение нагрузкой, МПа	Однородный образец	50% включений	70% включений
-15°C, 15%	Диаметр включений 50 мм			
	БУ	2,61	5,18	4,88
	1,6	10,81	5,8	5,34
	3,1	13,79	5,83	5,66
	Диаметр включений 40 мм			
	БУ	2,61	4,57	4,19
	1,6	10,81	4,79	4,48
	3,1	13,79	4,9	4,73
-5°C, 10%	Диаметр включений 50 мм			
	БУ	0,97	4,72	4,5
	1,6	2,66	5,17	5,17
	3,1	4,35	5,54	5,5
	Диаметр включений 40 мм			
	БУ	0,97	3,94	3,89
	1,6	2,66	4,38	4,16
	3,1	4,35	4,54	4,68

### Выводы

Таким образом, показано, что концентрация включений вызывает усиление или ослабление прочности исследуемых образцов в зависимости от плотности упаковки. Добавление включений различного грансостава в песчаную матрицу при изготовлении образца, приводит к возрастанию прочности смерзания в 1,4 – 1,5 раза для различных температурно-влажностных условий. Дальнейшее увеличение включений до 70% приводит к

уменьшению прочности смерзшегося взорванного массива, поскольку при большом количестве включений связующего становится недостаточно для цементирования всех включений, происходит соприкосновение включений между собой, и как следствие, возникает разрыв связей по контактам включений.

Полученные данные необходимы для корректного выбора типов и моделей выемочной техники, так как именно показатель трудности экскавации указывает на то, насколько сложными будут выемочные работы в зависимости от прочностных характеристик разрабатываемых пород [11].

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0297-2021-0020, ЕГИСУ НИОКТР № 122011800086-1). Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН тепловизора FLIRSC 660.

#### Список литературы

1. Yue Zhao, Abbas Taheria, Murat Karakusa, Zhongwei Chen, An Deng. Effects of water content, water type and temperature on the rheological behaviour of slag-cement and fly ash-cement paste backfill // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020, vol. 30, iss. 3, pp. 271-278.
2. Anvari S.M., Shooshpasha I., Kutanaei S.S. Effect of granulated rubber on shear strength of fine-grained sand // *J. of Rock Mech. and Geotech. Eng.* 2017, vol. 9, iss. 5, pp. 936 - 944.
3. Yang J.P., Chen W.Z., Yang D.S., Yuan J.Q. Numerical determination of strength and deformability of fractured rock mass by FEM modeling // *Computers and Geotechnics*. 2015, no. 64, pp. 20-31.
4. Низаметдинов Ф.К., Нагибин А.А., Левашов В.В. Натурные методы исследования прочностных свойств горных пород и породных контактов // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. – 2016. – №2. – С. 26-33.
5. Алькова Е.Л. Методический подход к экспериментальным исследованиям прочности смерзшихся дисперсных пород. // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2015. – № S30. – С. 356-364.
6. Патент №2629610 РФ. Способ изготовления смерзшихся образцов, структурно сопоставимых с взорванным массивом горных пород / Панишев С.В., Ермаков С.А., Алькова Е.Л., Максимов М.С., Козлов Д.С. – Заявка №2016121595 от 31.05.2016; опубл. 30.08.2017, Бюл. №25.
7. Алькова Е.Л., Панишев С.В., Козлов Д.С., Максимов М.С. Экспериментальные исследования прочности на срез мерзлых горных пород на образцах большого размера // *Успехи современного естествознания*. – 2016. – № 8. – С. 145-149.
8. Могилевцева Д.И. Влияние формы, количества, состава и пространственного расположения включений на прочностные и деформационные характеристики геокомпозиата // *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*. – 2012. – № 4. – С. 371-375.
9. Кульжигитов Р.К., Козионов В.А. Влияние включений дресвы на прочность глинистых грунтов при одноплоскостном сдвиге // *Наука и техника Казахстана*. – 2007. – №3. – С. 57-63.
10. Ржевский В.В. Процессы открытых горных работ. – М.: Недра, 1978. – 541 с.
11. Рогальский Б.С., Войтюк Ю.П. Способы определения категории горных пород по трудности экскавации // *Вестник Винницкого политехнического института*. – 2005. – № 6(63). – С. 180-186.

#### References

1. Yue Zhao, Abbas Taheria, Murat Karakusa, Zhongwei Chen, An Deng. Effects of water content, water type and temperature on the rheological behaviour of slag-cement and fly ash-cement paste backfill // *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020, vol. 30, iss. 3, pp. 271-278.
2. Anvari S.M., Shooshpasha I., Kutanaei S.S. Effect of granulated rubber on shear strength of fine-grained sand // *J. of Rock Mech. and Geotech. Eng.* 2017, vol. 9, iss. 5, pp. 936 - 944.
3. Yang J.P., Chen W.Z., Yang D.S., Yuan J.Q. Numerical determination of strength and deformability of fractured rock mass by FEM modeling // *Computers and Geotechnics*. 2015, no. 64, pp. 20-31.
4. Nizametdinov F.K., Nagibin A.A., Levashov V.V. Natural methods for studying the strength properties of rocks and rock contacts // *Physico-technical problems of mineral development*. 2016, no. 2, pp. 26-33.
5. Alkova E.L. Methodological approach to experimental studies of the strength of frozen dispersed rocks. // *Mining information and analytical bulletin*. 2015, No. S30, pp. 356-364.
6. Patent No. 2629610 RU. Method for producing frozen samples that are structurally comparable to blasted rock masses / S.V. Panishev, S.A. Ermakov, E.L. Alkova, M.S. Maksimov, D.S. Kozlov. – Appl. No. 2016121595 dated 05.31.2016, publ. 08/30/2017, Bul. No. 25.
7. Alkova E.L., Panishev S.V., Kozlov D.S., Maksimov M.S. Experimental studies of the shear strength of frozen rocks on large samples // *Advances in modern science*. 2016, no. 8, pp. 145-149.

8. Mogilevtseva D.I. The influence of the shape, quantity, composition and spatial arrangement of inclusions on the strength and deformation characteristics of the geocomposite // *Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology*. 2012, no. 4, pp. 371-375.
9. Kulzhigitov R.K., Kozionov V.A. The influence of debris inclusions on the strength of clayey soils under single-plane shear // *Science and technology of Kazakhstan*. 2007, no. 3, pp. 57-63.
10. Rzhovsky V.V. Processes of open-pit mining. – M.: Nedra, 1978. – 541 p.
11. Rogalskiy B.S., Voytyuk Yu.P. Methods for determining the category of rocks based on the difficulty of excavation // *Bulletin of the Vinnitsa Polytechnic Institute*. 2005, no. 6(63), pp. 180-186.

*Сведения об авторах:*

*Information about authors:*

<b>Алькова Елена Леонидовна</b> – кандидат технических наук, старший научный сотрудник	<b>Alkova Elena Leonidovna</b> – candidate of technical sciences, senior researcher
<b>Панишев Сергей Викторович</b> – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник	<b>Panishev Sergey Viktorovich</b> – candidate of technical sciences, leading researcher
<b>Максимов Михаил Савич</b> – младший научный сотрудник	<b>Maksimov Mikhail Savich</b> – junior researcher
Nelealc12@rambler.ru	

*Получена 11.10.2023*