РАЗДЕЛ II. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

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

К вопросу о трудности экскавации смерзающегося взорванного массива

*Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН
(Россия, Якутск)*

doi: 10.18411/lj-09-2019-06

idsp: ljournal-09-2019-06

Аннотация

Установлены закономерности изменения механических характеристик однородной и неоднородной структуры смерзшихся геоматериалов в зависимости от гранулометрического состава, температуры, влажности и плотности упаковки образца. Выявлено, что наибольшее влияние на прочность образцов, структурно сопоставимых с взорванным массивом, оказывает влажность. Показано, что взорванный массив многолетнемерзлых пород, склонный к повторному смерзанию, является сложной средой, обладающей свойствами нарушенного и однородного массива.

Ключевые слова: смерзание, трудность экскавации, прочность на срез, вскрышные породы, лабораторные исследования

Abstract

The regularities of changes in the mechanical characteristics of a homogeneous and inhomogeneous structure of frozen geomaterials depending on the particle size distribution, temperature, humidity and packing density of the sample are established. It was revealed that humidity has the greatest impact on the strength of samples that are structurally comparable to a blasted massif. It is shown that the blasted permafrost massif, which is prone to re-freezing, is a complex medium with the properties of a disturbed and homogeneous massif.

Keywords: freezing, the difficulty of excavation, shear strength, overburden, laboratory research

Введение

Якутия относится к важнейшим минерально-сырьевым и горнодобывающим регионам России. При этом, значительная доля полезных ископаемых добывается открытым способом. В связи с тем, что открытые горные работы ведутся в условиях криолитозоны, климатические факторы играют весьма существенное влияние на производственный процесс. Разработка месторождений, когда породы находятся в мерзлом состоянии, осуществляется только после их предварительного рыхления взрывным способом. Основным показателем, характеризующим процесс экскавации, является удельное сопротивление копанью, на величину которого влияют физико-механические характеристики горных пород, тип применяемой горной техники, конструкция и параметры рабочего органа, и порядок отработки забоя. В совокупности все эти показатели влияют на производительность экскаватора. Поэтому для правильного выбора типа экскавационного оборудования и эффективности его использования необходима достоверная оценка прочностных характеристик взорванного массива в условиях его повторного смерзания.

Исследования многолетнемерзлых грунтов, выявление их прочностных характеристик занимает умы многих ученых разных стран, так как динамика многолетней мерзлоты влияет на устойчивость горных пород, на сопротивление сдвигу. В основном эти исследования ведутся в области строительства [1-5], устойчивости

бортов карьеров и отвалов [6, 7] Ведутся исследования трудности разработки мерзлых грунтов с целью усовершенствования рабочих органов горных машин [8-10].

Для оценки прочностных характеристик смерзающегося взорванного массива в Институте горного дела Севера был сконструирован специальный стенд, позволяющий в лабораторных условиях, на образцах большого размера, проводить испытания и определять прочность на срез мерзлых пород (Рисунок 1).

Рисунок 1 – Лабораторный стенд исследований мерзлых пород на срез (сдвиг). 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».

Конструкция стенда позволила проводить испытания на образцах, структурно сопоставимых с взорванным массивом, представляющих собой цилиндр диаметром 350 мм и высотой 175 мм (Рисунок 2).

Рисунок 2 – Вид однородного образца, не имеющего плоскости смерзания

В соответствии с разработанной методикой исследований [11] выполнялся ряд испытаний на образцах различной структуры и плотности (Таблица 1)

Таблица 1

Факторы, учитываемые в исследованиях

	Название	Вариация	Размерность
1.	Температура замораживания образцов (t)	-5	°C
		-10	
		-15	
2.	Влажность пород (w)	5	%
		10	
		15	
3.	Размер включений кубической формы (dcp.)	Без включений	мм
		10 x10x10	
		20x20x20	
		40x40x40	
4.	Нормальное давление при формировании образца (P)	Без уплотнения	МПа (τ)
		1,6 (1,3)	
		3,1 (2,5)	

Цель данных исследований - определение основных механических свойств взорванного массива смерзающихся вскрышных пород и оценка его экскавируемости.

Материалы и методы исследования

Для выполнения исследований изготавливались образцы, исходным материалом для которых послужили вскрышные породы Кангаласского бурогоугольного месторождения, представляющие собой песчаники средне- и мелкозернистые. Плотность скелета исследуемого грунта составляла $1,5 \text{ г/см}^3$. При увеличении влажности с 5 до 15% плотность изменялась от 1,6 до $1,7 \text{ г/см}^3$. При уплотнении образца нагрузкой 1,6 МПа плотность увеличивалась с 1,72 до $1,89 \text{ г/см}^3$ в тех же диапазонах влажности. При условии уплотнения образец помещался в прибор, состоящий из реечного пресса и динамометра со стрелочным индикатором. Включения изготавливались из того же геоматериала, что и однородный образец, т.е. связующее и включения – одна и та же порода.

Испытания подготовленных образцов проводилось путем плавного увеличения сдвигающей нагрузки гидравлическим домкратом, и считалось законченным, когда происходил мгновенный срыв части пород, находящейся в верхней кассете, по отношению к нижней, или когда общая деформация среза превышала 5 мм. Величина разрушающей нагрузки регистрировалась по максимальному значению давления, зафиксированному с помощью измерительного комплекса «Мера». Поверхность среза показана на рисунке 3, где в образце с включениями $40 \times 40 \times 40 \text{ мм}$ отчетливо видны замороженные кубики, включения кубиков меньшего размера и увеличении нормального давления до 3,1 МПа такой четкой картины уже не наблюдалось.

Результаты исследования и их обсуждение

По полученным, в ходе исследований, значениям предела прочности на срез (сдвиг) были установлены зависимости прочности от влажности и температуры образца, что показано на рисунке 3. Полученные уравнения регрессии выявили, что влияние температуры смерзания породы в образце на усилие сдвигу (срезу) сказывается, не так значительно, как влажность породы.

Рисунок 3 – Поверхность среза однородного образца и с включениями размером $40 \times 40 \times 40 \text{ мм}$

Рисунок 4 – Зависимость прочности на срез от влажности и температуры смерзания породы

При влажности породы 5% образцы не смерзались, и проведение эксперимента не представилось возможным, поэтому за начало отсчета по оси Y принято значение предела прочности на срез, равным нулю.

Далее была произведена оценка расчетного показателя трудности экскавации и установлен класс экскавируемости, как для выемки из массива, так и для выемки разрушенных пород по формулам и классификации, предложенной Ржевским В.В. [12].

Выполненные расчеты показали, что для не уплотненных образцов однородной структуры различной влажности и температуры, показатель трудности экскавации (ПЭ) находится в пределах от 0 до 3, что соответствует I классу экскавируемости по классификации Ржевского В.В. При уплотнении пород в образце нагрузкой в 1,6–3,1 МПа прочностные характеристики исследуемого образца увеличиваются, вследствие чего возрастает и показатель трудности экскавации (рисунок 4). Породы при влажности 15%, температуре замерзания -15°C и уплотнении нагрузкой в 3,1 МПа в соответствии с классификации относятся к V классу по трудности экскавации. Указанные усилия уплотнения (1,6 и 3,1 МПа) соответствуют примерным условиям сжимающего давления пород на глубинах 10 и 20 метров от поверхности развала взорванной горной массы применительно к вскрышным породам Кангаласского бурогоугольного месторождения.

Рисунок 5 - Изменение показателя трудности экскавации породы (выемка из массива) в зависимости от влажности, температуры и плотности пород

Выполненными экспериментальными исследованиями установлено, что при уплотнении образцов нарушенной структуры до 3,1 МПа значения прочности на срез становятся сопоставимы с прочностными характеристиками однородного массива. Так при влажности 15% и температуре замерзания породы -15°C предел прочности на срез смерзшихся разрушенных пород составляет 1,67 – 1,76 МПа, в зависимости от среднего куска, что сопоставимо с пределом прочности на срез образца однородной структуры в тех же диапазонах температуры и влажности и нагрузки в 1,6 МПа (таблица 2).

Таблица 2

Изменение показателя трудности экскавации при различных условиях состояния массива: влажность породы 15%, температура -15°C

	Однородная структура Р = 1,6 МПа	Нарушенная структура, нагрузка Р = 1,6 МПа			Нарушенная структура, нагрузка Р = 3,1 МПа		
		40 мм	20 мм	10 мм	40 мм	20 мм	10 мм
Предел прочности на срез, МПа	1,65	1,22	1,52	1,2	1,67	1,74	1,76
Показатель трудности экскавации	10,81	4,48	2,17	1,18	$\frac{4,73}{10,99}$	$\frac{2,3}{11,4^*}$	$\frac{1,15}{11,5^*}$

Примечание: * - в знаменателе показатель трудности экскавации, рассчитанный по формуле для выемки из однородного массива.

Это позволяет сделать вывод о том, что расчет показателя трудности экскавации по формуле нарушенного массива в условиях максимальных нагрузок (по условию эксперимента в 3,1 МПа) не целесообразен, так как приводит к занижению ПЭ, что не соответствует действительности. Предел прочности на срез в этих условиях соответствует условиям однородной структуры, что обуславливает использование для расчета ПЭ выражения для выемки из массива мягких, плотных и полускальных пород.

Выводы

Таким образом, можно утверждать, что взорванный массив многолетнемерзлых пород, склонный к повторному смерзанию является сложной средой, обладающей свойствами как нарушенного, так и однородного массива. Верхнюю часть развала взорванной породы в условиях незначительных усилий нормального давления по высоте можно отнести к разрушенной (взорванной среде), а нижняя часть развала породы, в условиях более значительного давления, обладает уже более свойствами однородной среды. Поэтому, при определении показателя трудности экскавации взорванного смерзающегося массива горных пород это необходимо учитывать. Результаты исследований в дальнейшем послужат раскрытию механизма формирования прочностных характеристик смерзающейся взорванной горной массы в условиях месторождений криолитозоны.

1. Мелкишев О. А., Мерсон М. Э., Зарембо И. И., Алванян А. К. Прогноз эквивалентного сцепления многолетнемерзлых грунтов // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10-14. – С. 3166-3170
2. Liu J., Lv P., Cui Y., and Liu J. Experimental study on direct shear behavior of frozen soil-concrete interface, Cold Regions Sci. and Tech., 2014, Vol. 104 – 105. — P. 1 – 6.
3. Lu P. and Liu J. An experimental study on direct shear tests of frozen soil-concrete interface Tiedao Xuebao, J. of the China Railway Society, 2015, Vol. 37, Issue 2. — P. 106 – 110.
4. Anvari S.M., Shooshpasha I., Kutanaei S.S. Effect of granulated rubber on shear strength of fine-grained sand. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2017, volume 9, issue 5, pp. 936-944.
5. Michael Krautblatter, Daniel Funk, and Friederike K. Günzel /Why permafrost rocks become unstable: a rock-ice-mechanical model in time and space // EARTH SURFACE PROCESSES AND LANDFORMS Earth Surf. Process. Landforms 38, 876–887 (2013) Copyright © 2013 John Wiley & Sons, Ltd. Published online 11 February 2013 in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com) DOI: 10.1002/esp.3374
6. Цирель С. В., Гапонов Ю. С., Павлович А. А. Гранулометрический состав, сдвиговая прочность разрушенных горных пород и их влияние на устойчивость отвалов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). Отдельная статья (специальный выпуск). – 2013.- №12. – 12 с. – М.: издательство «Горная книга»
7. Гапонов Ю. С. Геомеханическое обоснование устойчивости породных отвалов с учетом влияния характеристик разрушенной горной массы: автореферат дис. кандидата технических наук: 25.00.20 / Санкт-Петербург, 2015. – 20 с.
8. Недорезов И.А. Прогнозирование трудности разработки грунтов землеройными машинами // Строительные и дорожные машины. 2008. - № 2. – С.43-44.
9. Васильев С. И., Ереско С. П. Исследование прочностных характеристик сезонно-мерзлых грунтов Сибири и Севера // Системы. Методы. Технологии. - 2010. - №1(5). – С. 93 - 99.
10. Шемякин С. А., Иванченко С. Н., Мамаев Ю. А. Ведение открытых горных работ на основе совершенствования выемки пород . М.: Издательство «Горная книга», 2008. – 315 с.
11. 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
12. Ржевский В. В. Процессы открытых горных работ. — М.: Недра, 1978. — 541 с.