

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАГНИЙСОДЕРЖАЩИХ
ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ****Худякова Л.И., Котова И.Ю.***ФГБУН Байкальский институт природопользования Сибирского отделения
Российской академии наук, Улан-Удэ, e-mail: lkhud@binm.ru*

В условиях настоящего времени проблема использования отходов горнопромышленного комплекса приобретает все большую актуальность. Количество вскрышных, вмещающих пород и некондиционного сырья постоянно возрастает. В отвалах находятся огромные объемы магнийсодержащего сырья, утилизация которых является актуальной задачей. Основные направления использования горных отходов – это рекультивация земель и строительная отрасль, в частности производство строительных материалов. Целью работы является установление возможности использования магнийсодержащего сырья при получении тяжелых бетонов. Изучен гранулометрический состав щебня из магнийсодержащих отходов и определены основные физико-механические свойства. Щебень всех видов имеет марку по дробимости М1400, по истираемости II. Он различается содержанием зерен пластинчатой и игловатой формы. Установлено, что щебень можно использовать в качестве крупного заполнителя для бетонов. Изучены механические показатели полученных бетонов. Установлено, что использование щебня из базальта и нефрита не оказывает значительного влияния на прочность образцов при сжатии. Щебень из серпентинита снижает прочность бетонов более чем на 5% по сравнению с контрольным образцом. Плотность полученных бетонов также зависит от вида щебня. Наименьшее значение зафиксировано у бетонов с серпентинитовым щебнем (2301 kg/m^3), наибольшее – с базальтовым щебнем (2391 kg/m^3). Таким образом, щебень из магнийсодержащих горнопромышленных отходов является перспективным сырьевым материалом для получения тяжелых бетонов. Вовлечение в строительное производство горнопромышленных отходов позволит сократить количество земель, занятых отвалами, и снизить негативное воздействие на окружающую среду. Кроме того, появляется возможность расширения номенклатуры сырьевых материалов и снижения себестоимости производимых бетонов.

Ключевые слова: магнийсодержащие отходы, щебень, бетон, прочность при сжатии, крупный заполнитель

USE OF MAGNESIUM-CONTAINING MINING WASTE**Khudyakova L.I., Kotova I.Yu.***Baikal Institute of Nature Management Siberian branch of the Russian Academy of sciences,
Ulan-Ude, e-mail: lkhud@binm.ru*

In the conditions of the present time, the problem of using waste from the mining complex is becoming increasingly important. The number of overburden, host rocks and substandard raw materials is constantly increasing. In the dumps there are huge volumes of magnesium-containing raw materials, the utilization of which is an urgent task. The main use of mining waste is land reclamation and the construction industry, in particular, the production of building materials. The aim of the work is to establish the possibility of using magnesium-containing raw materials in the production of heavy concrete. The granulometric composition of crushed stone from magnesium-containing waste was studied and the main physical and mechanical properties were determined. Crushed stone of all types has a grade of crushability M1400, abrasion II. It differs in the content of lamellar and needle shaped grains. It has been established that crushed stone can be used as a coarse aggregate for concrete. The mechanical properties of the obtained concretes have been studied. It has been established that the use of crushed stone from basalt and nephrite does not significantly affect the compressive strength of the samples. Crushed stone from serpentinite reduces the strength of concrete by more than 5% compared to the control sample. The density of the resulting concrete also depends on the type of crushed stone. The lowest value was recorded for concrete with serpentinite crushed stone (2301 kg/m^3), the highest – with basalt crushed stone (2391 kg/m^3). Thus, crushed stone from magnesium-containing mining waste is a promising raw material for the production of heavy concrete. The involvement of mining waste in the construction industry will reduce the amount of land occupied by dumps and reduce the negative impact on the environment. In addition, it becomes possible to expand the range of raw materials and reduce the cost of concrete produced.

Keywords: magnesium-containing mining waste, crushed stone, concrete, compressive strength, coarse aggregate

В условиях настоящего времени проблема использования отходов горнопромышленного комплекса приобретает все большую актуальность. Об этом свидетельствует пристальное внимание к данной сфере со стороны государственных органов нашей страны: проводятся рабочие совещания, издаются официальные документы. Так, в июне текущего года Президентом РФ утвержден Перечень поручений, направленных на развитие перспективной минерально-сырьевой базы, где, в частности,

сказано о глубокой переработке твердых полезных ископаемых, а также о вовлечении в хозяйственный оборот вскрышных и вмещающих горных пород. Разработан Федеральный проект «Экономика замкнутого цикла», который позволит минимизировать количество образуемых отходов. Заместитель Председателя Правительства Виктория Абрамченко заявила, что одна из главных отраслей, где необходима экономика замкнутого цикла, – это недропользование, поскольку «отходы должны стать вторичным

материальным ресурсом и использоваться как в рекультивации земель, так и в строительном комплексе».

Все принятые решения обусловлены огромным объемом накопившихся горнопромышленных отходов, которые необходимо утилизировать и количество которых с каждым годом возрастает. По данным Федеральной службы по надзору в сфере природопользования, в 2021 г. в России образовалось 7 690 515,5 тыс. т отходов от добычи полезных ископаемых, что составляет 91% от всех образованных отходов. Менее половины из них (45,6%) были утилизированы и обезврежены. Прирост образуемых и используемых отходов горнопромышленного комплекса по отношению к предыдущему году в течение последних 5 лет представлен на рисунке 1.

Наименьшее количество образованных и утилизированных отходов зафиксировано в 2020 г., что обусловлено сложной эпидемиологической обстановкой во всем мире. Однако уже в 2021 г. образовалось на 33% отходов больше, чем в 2017 г., и основная масса из них перемещена в отвалы. С каждым годом объемы горнопромышленных отходов возрастают, в связи с чем вопросы их утилизации являются актуальными, требующими своего решения.

Основными направлениями использования горнопромышленных отходов являются рекультивация нарушенных земель и производство строительных материалов. Это нашло отражение в работах ученых разных стран мира [1–3]. Большое количество из них содержит исследования по получению бетонов, поскольку более 80% их объема приходится на долю заполнителей, которые можно заменить отходами.

Обычно в качестве крупного заполнителя используются гранит и гравий. В ряде статей рассматривается возможность замены их известняком и песчаником, однако марочная прочность полученных бетонов не превышает показатели бетонов на гранитном щебне [4, 5]. Положительное влияние на механические показатели бетонов оказывает замена традиционного заполнителя кварцитом, диабазом, базальтом [6–8]. Повышенная прочность наблюдается у бетонов с добавкой высокомагнезиальных вскрышных пород [9, 10]. Поскольку наличие магнийсодержащих минералов в составе горнопромышленных отходов влияет на качество бетонов на их основе, актуальной задачей является расширение номенклатуры магнийсодержащих горнопромышленных отходов, которые можно использовать в качестве крупного заполнителя.

Исходя из вышесказанного, целью настоящих исследований является установление возможности использования некондиционного магнийсодержащего сырья в производстве тяжелых бетонов.

Материалы и методы исследования

В качестве крупного заполнителя использовались магнийсодержащие горнопромышленные отходы, представленные серпентинитом, некондиционным нефритом и базальтом месторождений Республики Бурятия. Гранитный щебень применялся в контрольных образцах. В качестве мелкого заполнителя использовался кварцполевошпатовый песок с модулем крупности 2,5 и содержанием пылевидных и глинистых частиц 1,77%, в качестве вяжущего – портландцемент ЦЕМ I 42.5Н.

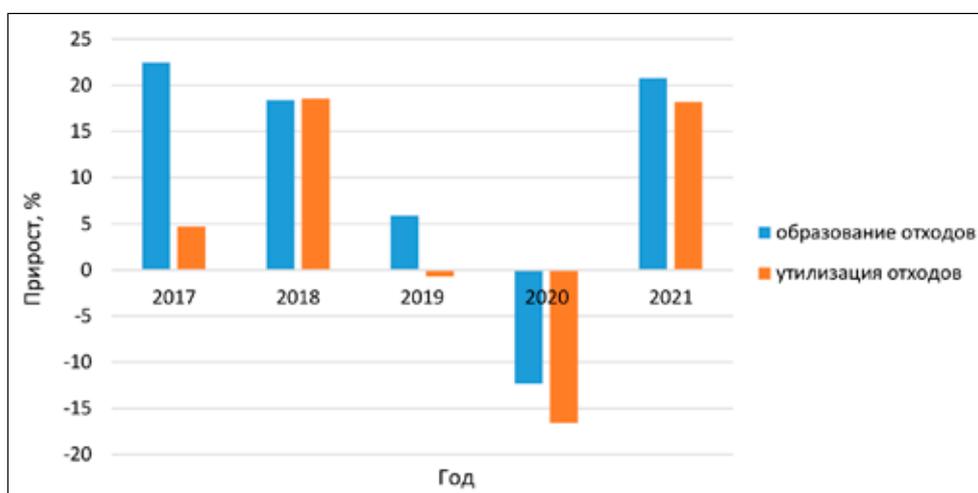


Рис. 1. Прирост образуемых и утилизируемых отходов

Таблица 1

Химический состав крупного заполнителя

Основные оксиды	Содержание основных оксидов, масс. % в породах			
	Серпентинит	Некондиционный нефрит	Базальт	Гранит
SiO ₂	41,80	56,20	49,10	66,14
Al ₂ O ₃	0,30	0,94	16,00	15,41
Fe ₂ O ₃	4,50	3,49	9,62	5,63
MgO	40,66	22,37	4,25	1,12
CaO	0,43	13,48	6,82	2,27
Na ₂ O	0,10	0,04	3,64	3,01
K ₂ O	0,01	0,03	1,77	3,84
п.п.п.*	12,54	3,41	6,80	1,20

Примечание: * потери при прокаливании.

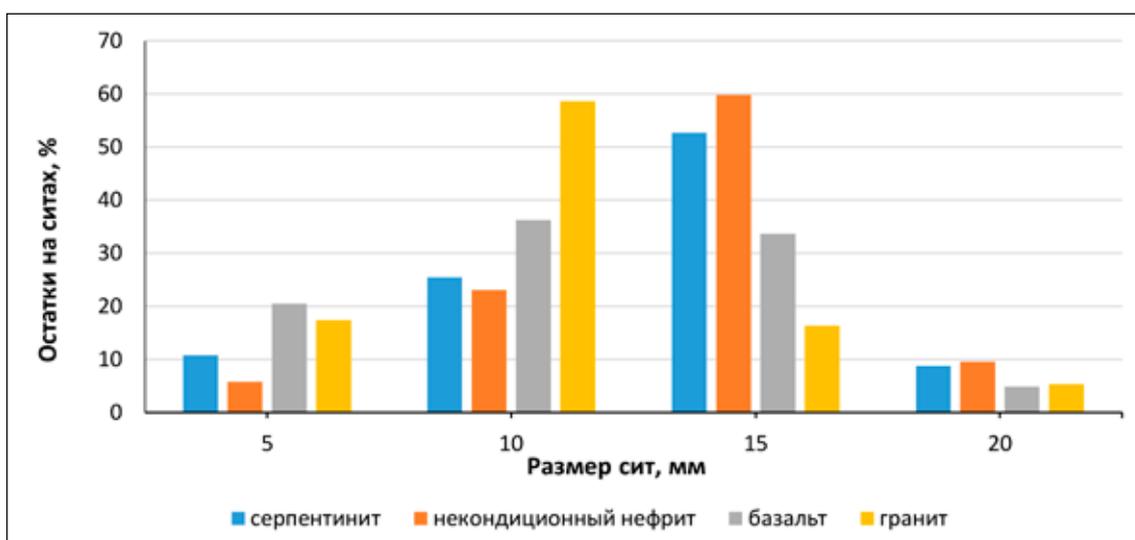


Рис. 2. Гранулометрический состав щебня

Проведение исследований включало химический, гранулометрический анализы, а также физико-механические испытания. При выполнении химических анализов применялись методы атомно-адсорбционной спектроскопии и гравиметрии. Гранулометрический анализ выполнен методом распада пород по крупности их частиц на ситах с различным диаметром отверстий. Предел прочности при сжатии определен с помощью разрушающего метода при воздействии нагрузки на образцы. Использовалось следующее оборудование: спектрофотометр SOLAAR-6M, электронные весы ВСЛ-200/0,1A, испытательный гидравлический пресс ПГМ-100, стандартный набор сит.

Результаты исследования и их обсуждение

На начальном этапе исследований был изучен химический состав сырьевых материалов, который представлен в таблице 1.

Исследуемые породы различаются количественным содержанием основных оксидов. Содержание оксида магния изменяется от 40,66% у серпентинита до 4,25% у базальта. Максимальное количество оксида алюминия наблюдается у базальта, а оксида кальция – у некондиционного нефрита. Наибольшее количество оксидов щелочных металлов зафиксировано у базальта.

Изучены основные свойства щебня из исследуемых пород, поскольку качество

бетонов зависит от вида, плотности, прочности, формы зерен входящих в его состав заполнителей [11–13]. Гранулометрический состав щебня представлен на рисунке 2.

Полученные данные свидетельствуют о том, что наиболее крупные зерна щебня наблюдаются у некондиционного нефрита, где количество щебня с размером частиц свыше 15 мм превышает 69%. Это объясняется спутано-волокнутой структурой входящих в его состав минералов, обуславливающих вязкость и прочность породы. У серпентинита с минералами слоистого и чешуйчато-волокнутого строения данный показатель составляет 61,5%, у базальта, сложенного каркасными алюмосиликатами, – 38,5%. Наиболее мелкие зерна характерны для гранита с мелкокристаллической структурой, в котором содержится 76% зерен размером до 10 мм.

Установлено, что изучаемый щебень всех видов имеет марку по дробимости М1400, по истираемости III, по морозостойкости F400. Он различается содержанием зерен пластинчатой и игловатой формы, которые негативно сказываются на качестве производимого бетона. В щебне из серпентинита их количество составляет 9,2%, из некондиционного нефрита – 23,4%, из базальта – 7,3%. Наличие зерен слабых пород, пылевидных и глинистых частиц во всех

видах щебня не зафиксировано. Определена средняя плотность щебня: у серпентинита она равна 2710 кг/м³, у некондиционного нефрита – 2900 кг/м³, у базальта – 2980 кг/м³. В целом щебень из горнопромышленных отходов удовлетворяет требованиям ГОСТ 8267-93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия» и может использоваться как заполнитель для бетонов.

Изучено влияние вида щебня на прочностные характеристики бетонов. Исследования проводили на образцах – кубах с размером ребра 10 см. Бетонная смесь имела следующий состав: щебень 56%, песок 24%, цемент 14%, вода 6%. Бетоны изготавливали в соответствии с требованиями ГОСТ 26633-2015 «Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия». Образцы испытывали на сжатие после твердения в нормально-влажностных условиях в течение 7, 14, 21 и 28 суток. Полученные результаты представлены на рисунке 3.

Как видно из графических зависимостей, замена гранитного щебня щебнем из базальта и некондиционного нефрита не оказывает значительного влияния на прочность образцов при сжатии. При использовании щебня из серпентинита прочность бетонов снижается более чем на 5%.

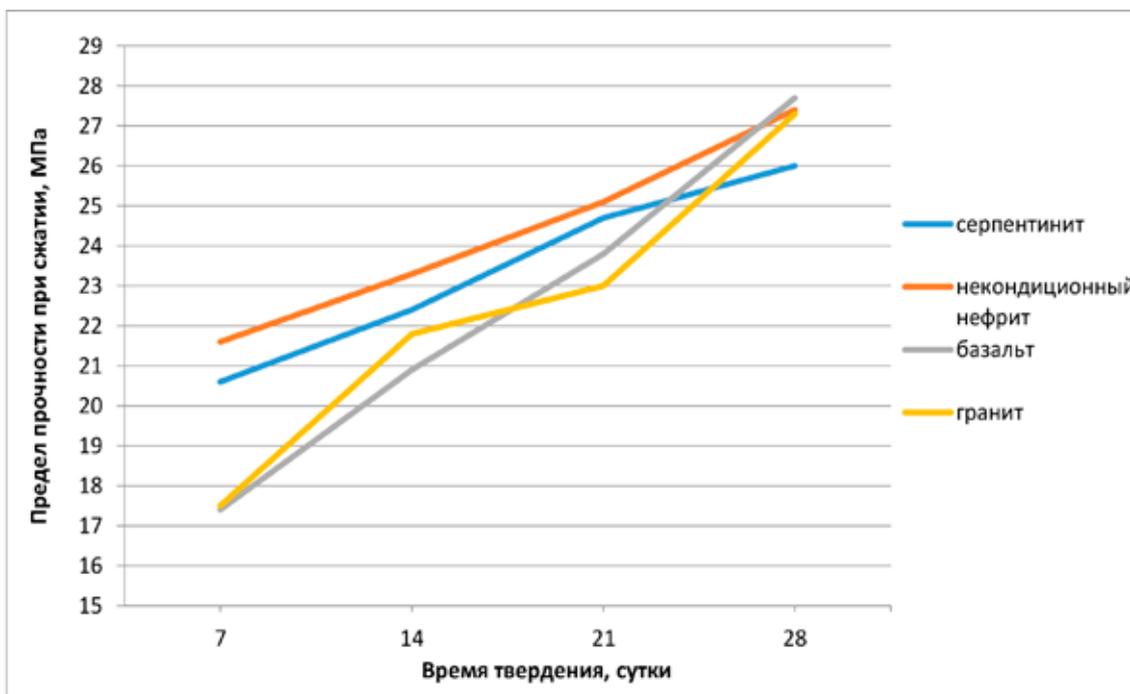


Рис. 3. Зависимость механических показателей бетона от вида щебня и времени твердения

Основные показатели бетонов

Основные показатели	Бетоны на крупном заполнителе из			
	серпентинита	нефрита	базальта	гранита
Средняя плотность, кг/м ³	2301	2387	2391	2340
Прочность при сжатии, МПа	26,0	27,4	27,7	27,3
Водостойкость, K _{разм.}	0,82	0,84	0,85	0,82
Морозостойкость, цикл	50	50	50	50

Следует отметить, что введение в состав бетонов щебня из серпентинита и некондиционного нефрита способствует набору их прочности в первые 7 суток твердения. При этом набор прочности бетонов с добавкой нефрита после 21 суток выдержки в нормально-влажностных условиях замедляется, а с добавкой серпентинита продолжает расти, практически линейно. Для образцов с базальтовым заполнителем характерен постепенный набор прочности.

Плотность полученных бетонов также зависит от вида крупного заполнителя. Наименьший показатель плотности зафиксирован у бетонов с серпентинитовым щебнем (2301 кг/м³), наибольший – с базальтовым щебнем (2391 кг/м³). Плотность бетонов с некондиционным нефритом составляет 2387 кг/м³.

Были изучены основные свойства бетонов на щебне из магнийсодержащих горнопромышленных отходов. Для установления долговечности выполнено определение морозостойкости. На основании проведенных исследований установлено, что они соответствуют марке F50. Немаловажным показателем качества бетонов является устойчивость их в водной среде. Исследована водостойкость полученных материалов и определен коэффициент размягчения, характеризующий данный показатель. Установлено, что его значения для магнийсодержащих бетонов находятся выше значений стандартного образца. Кроме того, необходимо отметить, что бетоны, содержащие в своем составе магнийсодержащий заполнитель, обладают повышенной сульфатостойкостью. Основные показатели бетонов представлены в таблице 2.

По своим физико-механическим свойствам бетоны на щебне из базальта и некондиционного нефрита превосходят контрольный образец. Применение серпентинитового щебня незначительно снижает прочность и плотность бетонов, не меняя остальные показатели.

Исходя из основных показателей полученных бетонов, следует заключить, что их можно использовать не только для изготовления фундаментов, но и для производства внутренних стеновых панелей.

Заключение

Таким образом, щебень из магнийсодержащих горнопромышленных отходов является перспективным сырьевым материалом для получения тяжелых бетонов. По гранулометрическому составу и основным характеристикам он соответствует требованиям ГОСТ 8267-93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия» и может использоваться в строительстве. Прочность и водостойкость бетонов, полученных на магнийсодержащем щебне, за исключением серпентинитового, не уступают соответствующим показателям контрольного образца на гранитном щебне.

Вовлечение в строительное производство горнопромышленных отходов позволит сократить количество земель, занятых отвалами, и снизить негативное воздействие на окружающую среду. Кроме того, появляется возможность расширения номенклатуры сырьевых материалов и снижения себестоимости производимых бетонов.

Работа выполнена в рамках государственного задания БИП СО РАН, № ААА-А21-121011890003-4 с использованием приборов и оборудования Центра коллективного пользования.

Список литературы

1. Retka J., Rzepa G., Bajda T., Drewniak L. The use of mining waste materials for the treatment of acid and alkaline mine wastewater. Minerals. 2020. Vol. 10. P. 1061. DOI: 10.3390/min10121061.
2. Ally A.N., Blanche M.M., Nana U.J.P., Grâce M.M., François N., Pettang C. Recovery of mining wastes in building materials: A Review. Open Journal of Civil Engineering. 2021. Vol. 11. P. 379-397. DOI: 10.4236/ojce.2021.114022.
3. Cobirzan N., Muntean R., Thalmaier G., Felseghi R.-A. Recycling of mining waste in the production of masonry units. Materials. 2022. Vol. 15. P. 594. DOI: 10.3390/ma15020594.

4. Стельмах С.А., Шербань Е.М., Мозговая А.С., Скуч М.С. Исследование и сравнительный анализ вариантов комбинирования крупных заполнителей различных видов для тяжелого бетона вибрированных железобетонных изделий и конструкций // Вестник Евразийской науки. 2019. Т. 11. № 3. URL: <https://esj.today/PDF/29SAVN319.pdf> (дата обращения 29.09.2022).
5. Sarireh M., Al-Baijat H. Local aggregate in production of concrete mix in Jordan. *Open Journal of Civil Engineering*. 2019. Vol. 9. P. 81-94. DOI: 10.4236/ojce.2019.92006.
6. Quayson J.H., Mustapha Z. Impact of coarse aggregate on compressive strength of concrete. *Built Environment Journal*. 2019. Vol. 16. No. 1. P. 49-58.
7. Wang L., Yong H., Lu J., Shu C., Wang H. Influence of coarse aggregate type on the mechanical strengths and durability of cement concrete. *Coatings*. 2021. Vol. 11. P. 1036. DOI: 10.3390/coatings11091036.
8. Li P.P., Yu Q.L., Brouwers H.J.H. Effect of coarse basalt aggregates on the properties of ultra-high performance concrete (UHPC). *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 170. P. 649-659. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.109.
9. Kislov E.V., Khudyakova L.I. Yoko-Dovyren layered massif: Composition, mineralization, overburden and dump rock utilization. *Minerals*. 2020. Vol. 10. P. 682. DOI: 10.3390/min10080682.
10. Худякова Л.И., Войлошников О.В., Тимофеева С.С. Магнийсиликатные отходы горнодобывающей промышленности и технологии их утилизации. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2014. 177 с.
11. Haddad L.D.O., Neves R.R., Oliveira P.V., Santos W.J., Junior A.N.C. Influence of particle shape and size distribution on coating mortar properties. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9. No. 4. P. 9299-9314. DOI: 10.1016/j.jmrt.2020.06.068.
12. Kim S.S., Qudoos A., Jakhani S.H., Lee J.B., Kim H.G. Influence of coarse aggregates and silica fume on the mechanical properties, durability, and microstructure of concrete. *Materials*. 2019. Vol. 12. P. 3324. DOI: 10.3390/ma12203324.
13. Ndon A.-I., Икре А.Е. Experimental study on the effect of different coarse aggregate sizes on the strength of concrete. *International Journal of Engineering and Innovative Research*. 2021. Vol. 3. No. 1. P. 29-38. DOI: 10.47933/ijeir.779307.