

УДК 622.732

Л.А. ВАЙСБЕРГ<sup>1</sup>, д-р техн. наук, член-корр. РАН (gornyi@mtspb.com);  
Е.Е. КАМЕНЕВА<sup>2</sup>, канд. техн. наук (elena.kameneva@mail.ru); А.В. СИНИЦЫН<sup>3</sup>, инженер

<sup>1</sup> НПК «Механобр-техника» (199021, г. Санкт-Петербург, 22-я линия, 3, корп. 5),

<sup>2</sup> Петрозаводский государственный университет (185910, Республика Карелия, г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33, ГГФ),

<sup>3</sup> Горнодобывающая компания Basalt AG (Россия) (185000, Республика Карелия, г. Петрозаводск, ул. Красная, 49, оф. 507)

## Современные методы исследования прочностных характеристик строительных горных пород при производстве щебня\*

Рассмотрены методы исследования прочностных свойств строительных горных пород. Выявлены различия методических подходов оценки прочности горных пород в отечественной и зарубежной практике. Отмечено, что в отечественной практике проектирования дробильно-сортировочных комплексов прочность горных пород оценивается по значению предела прочности при сжатии. За рубежом критерием оценки прочности горных пород является сопротивляемость воздействию ударным нагрузкам – стандартизованный метод падающего груза DWT, позволяющий определить удельную энергию разрушения и ударную прочность материала, на основании чего осуществляется моделирование технологии дробления и выбор дробильного оборудования. Указано на необходимость сопоставления результатов испытаний прочностных свойств горных пород, выполненных с применением различных методов и оцениваемых по различным показателям. Приведены результаты исследования различными методами прочности габбро-диабазы одного из промышленно разрабатываемых месторождений Карелии. Выполнена сравнительная оценка результатов, полученных с применением различных методов. По результатам экспериментов выявлены значительные колебания полученных значений как удельной энергии разрушения, так и предела прочности при сжатии. Указано на необходимость испытания значительного количества образцов для получения статистически значимых и достоверных результатов. Выявление неоднородности прочностных свойств горных пород имеет большое значение для оперативного управления процессом дезинтеграции. Обосновано, что для решения этой задачи необходима разработка и стандартизация методик оперативного определения прочности горных пород в заводских лабораториях.

**Ключевые слова:** эффективность производства, стандартизация, горные породы, методики определения прочности, статистическая достоверность, заводская лаборатория.

L.A. VAISBERG<sup>1</sup>, Doctor of Sciences (Engineering) (gornyi@mtspb.com),

E.E. KAMENEVA<sup>2</sup>, Candidate of Sciences (Engineering) (elena.kameneva@mail.ru), A.V. SINITSIN<sup>3</sup> Engineer

<sup>1</sup> Mechanobr-Tekhnika Research and Engineering Corporation (3, 22 liniya, V.O., 199106, St. Petersburg, Russian Federation)

<sup>2</sup> Petrozavodsk State University (33, Lenin Street, Petrozavodsk, 185910, Russian Federation)

<sup>3</sup> Mining company Basalt AG (Russian) (49, of. 507, Krasnaja Street, Petrozavodsk, 185000, Russian Federation)

### Contemporary Methods for Study of Strength Characteristics of Building Rocks When Producing Crushed Stone\*

Methods for the study of strength characteristics of building rocks are considered. The differences of methodic approaches to the evaluation of rock strength in domestic and foreign practice are revealed. It is noted that the domestic practice of design of crushing-and-sorting complexes assesses the strength of rocks according to the value of ultimate compressive strength. Abroad, the criterion of rock strength is a resistance to impact loads – the standardized method of drop weight (DWT), which makes it possible to determine the specific energy of destruction and impact strength of a material on the basis of which the simulation of crushing technology and selection of crushing equipment are executed. The need for comparing results of strength properties tests of rocks which are conducted with the use of different methods and assessed according to different values is indicated. Results of the strength study, using different methods, of gabbro-diorite of one of industrially developed deposits of Karelia are presented. The comparative assessment of results obtained with the use of different methods is made. On the basis of experiments, significant fluctuations in the obtained values both of the specific energy of destruction and ultimate compressive strength are revealed. The need to test a significant number of samples to obtain statistically significant and reliable results is indicated. The identification of heterogeneity in the strength properties of rocks is of great importance for operative control over the process of disintegration. It is substantiated that the solution of this problem requires the development and standardization of techniques for operative determination of strength of rocks in factory laboratories.

**Keywords:** efficiency of production, standardization, rocks, methods for strength determination, statistical reliability, factory laboratory.

Исследование физико-механических свойств горных пород является базой для обоснования технологической схемы дробления, выбора дробильного оборудования, а также для получения данных о количестве и качестве конечной продукции – щебня по фракциям.

В настоящее время в отечественной практике дезинтеграции оценка горных пород для производства строительного щебня проводится в соответствии с требованиями ГОСТ 31436–2011 «Породы горные скальные для производства щебня для строительных работ». Горные породы оценивают по петрографической характеристике и физико-механическим свойствам. Результаты испытаний позволяют выполнить предварительную оценку качества конечной продукции – щебня по фракциям.

При проектировании дробильно-сортировочных комплексов типоразмеры оборудования по стадиям определяются требуемой производительностью, крупностью исходного и готового продукта, а также прочностью пород. При этом паспортная производительность корректируется поправочными коэффициентами, имеющими значения от 0,8 до 1,2 для четырех категорий пород: особо прочные (более 250 МПа), прочные (180–250 МПа), средней прочности (60–180 МПа) и низкопрочные (менее 60 МПа).

Согласно установленным требованиям, прочность горных пород оценивается по значению предела прочности при сжатии и показателю дробимости щебня, полученного из данной породы. Прочность породы на со-

\* Работа выполнена при поддержке федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», проект № 14.574.21.0108.

\* The work was performed with the support of the Federal Target Program «Research and Development in Priority Areas of Scientific and Technical Advance in Russia in 2014–2020», project no. 14.574.21.0108.

Минеральный состав и плотность габбро-диабазы

Содержание минералов, %						Минеральная плотность, г/см <sup>3</sup>
Плагиоклаз	Пироксен	Магнетит	Кварц	Хлорит, биотит	Эпидот	
44	49,1	0,5	0,5	4	1,9	2,96–3,02

Таблица 1

Результаты испытания прочностных характеристик габбро-диабазы

Показатели	Значения показателей			Метод испытаний
	Наименьшее	Наибольшее	Среднее	
Предел прочности при сжатии, МПа	287	307	299	Сжатие на гидравлическом прессе
Дробимость щебня по фракциям крупности (потеря массы при испытании), %	5–20 мм	3,2	2,6	Сжатие (раздавливание) пробы щебня в цилиндре
	10–20 мм	2	1,9	
	20–40 мм	2,2	2,45	
Сопротивление щебня ударной нагрузке (потеря массы при испытании), %	3,9	5,5	4,7	Испытание на копре

Таблица 2

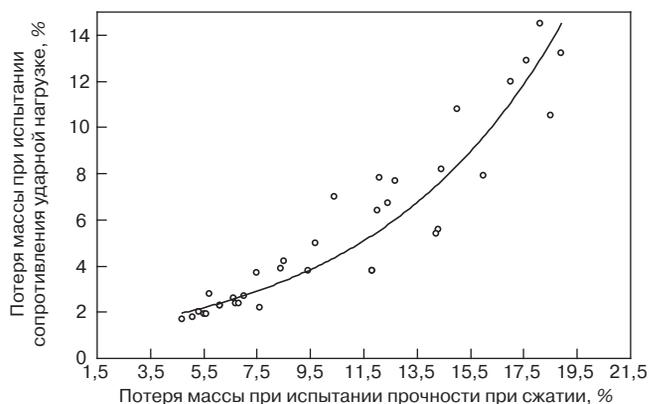


Рис. 1. Взаимосвязь прочности при сжатии (дробимости) и сопротивления удару (щебень фракции 20–40 мм)

противление ударным нагрузкам определяется только для пород, применяемых для производства железнобетонного щебня.

В зарубежной практике критерием оценки прочности горных пород является сопротивляемость воздействию ударным нагрузкам (стандартизованный метод падающего груза DWT, разработанный Центром минералогических исследований им. Крушнитта (Австралия) [1, 2]). Метод позволяет определить удельную энергию разрушения и ударную прочность материала, на основании чего осуществляется моделирование технологии дробления и осуществляется выбор дробильного оборудования.

В последние годы в горнопромышленном комплексе Карелии сложилась практика, согласно которой проектирование технологии дробления осуществляет фирма – производитель оборудования. Выбор оборудования осуществляется на основании результатов исследования физико-механических свойств горных пород, выполненных в российских испытательных лабораториях по отечественным методикам.

Лабораторные испытания щебня, выполненные по отечественным методикам, показали, что способность щебня сопротивляться сжимающей нагрузке (дробимость, оцениваемая по степени разрушения зерен при сжатии в цилиндре) коррелирует с сопротивлением удару (рис. 1).

Поскольку отечественные и зарубежные методики определения прочностных характеристик горных пород

существенно различаются, возникает необходимость сопоставления результатов испытаний прочностных свойств горных пород, выполненных с применением различных методов и оцениваемых по различным показателям.

В настоящей работе приведены результаты исследования прочности габбро-диабазы одного из промышленно разрабатываемых месторождений Карелии, выполненного с применением различных методов. Минеральный состав и минеральная плотность породы приведены в табл. 1.

Предел прочности при сжатии определен по стандартной методике на образцах кубической формы размером 50×50×50 мм, изготовленных из кусков породы, поступающих в дробилку первой стадии. Прочность щебня оценена для фракций крупности 5–20 мм, 10–20 мм, 20–40 мм по степени разрушения зерен при сжатии в цилиндре на гидравлическом прессе в соответствии с требованиями ГОСТ 8269.0–97. На сопротивление ударным нагрузкам испытан щебень крупностью 20–40 мм по ГОСТ 54748–2011. Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Анализ экспериментальных данных показывает, что исследуемая проба габбро-диабазы относится к высокопрочным породам, а полученный в результате дробления щебень имеет наивысшую марку по прочности 1400 (потеря массы при испытании не превышает 1,8–2,7%).

Для получения сравнительных данных аналогичные пробы габбро-диабазы были испытаны в трех независимых зарубежных лабораториях по методикам – упрощенным аналогом метода падающего груза DWT, разработанным фирмами Lokomo, Metso Minerals и Sandvik, которые применяются при оперативной оценке прочности строительных горных пород в испытательных лабораториях.

Удельная энергоёмкость дробления (рабочий индекс  $W_i$ , кВт·ч/т) определяется путем испытания сопротивляемости образцов пород ударной нагрузке. По значениям показателей рабочего индекса породы относят к легкодробимым ( $W_i < 8$  кВт·ч/т), среднедробимым (8–12 кВт·ч/т), сложнедробимым (12–16 кВт·ч/т), очень сложнедробимым ( $> 16$  кВт·ч/т).

**Испытания на копре (методика Lokomo).** Для испытаний берут десять образцов горных пород размерами 55–75 мм, имеющих как минимум две параллельные грани. Образец помещается в цилиндр копра (рис. 2), подвергается ударам молотка весом 32 кг, при этом высота падения молотка с каждым ударом увеличивается на 10 мм. Удары наносят до разрушения образца. Рабочий индекс дробления рассчитывается по формуле:

$$W_i = \frac{47,6A}{\rho}, \text{ кВт·ч/т,}$$

где  $A$  – сопротивление ударной нагрузке, Нм/мм;  $\rho$  – средняя плотность породы, г/см<sup>3</sup>.

Сопротивление ударной нагрузке определяется как:

$$A = \frac{320H}{h}, \text{ Нм/мм,}$$

где  $H$  – высота падения бойка, при которой произошло разрушение образца, м;  $h$  – толщина образца, мм.

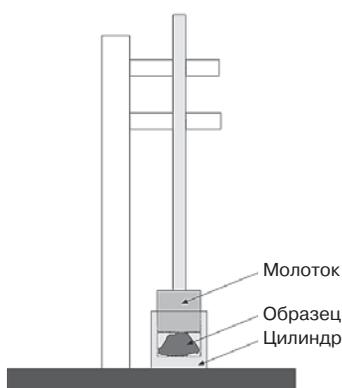


Рис. 2. Копер для определения сопротивления породы ударной нагрузки

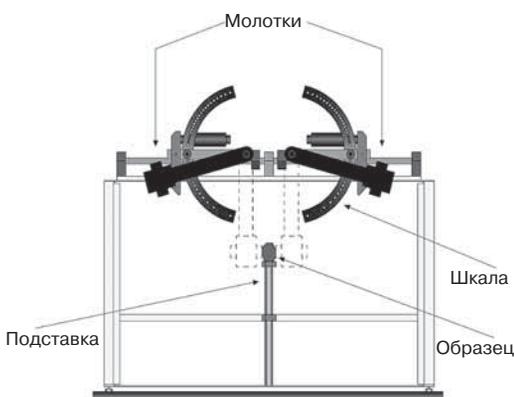


Рис. 3. Двухмолотковый маятниковый копер

$$W_i = 0,0285 \frac{A}{\rho}, \text{ кВт}\cdot\text{ч/т},$$

где  $A$  – сопротивление удару;  $\rho$  – средняя плотность, г/см<sup>3</sup>.

Сопротивляемость удару вычисляется как  $A = 129,64 (1 - \cos\alpha)$ , где  $\alpha$  – угол падения молотка. За результат берется среднее значение.

Сравнение результатов испытаний габбро-диабазы приведено в табл. 3.

Полученные результаты позволяют отнести исследуемую пробу габбро-диабазы к категории очень сложнотрещиновой породы, что согласуется с результатами определения предела прочности при сжатии (более 250 мПа – особо прочная порода). Соответственно щебень, полученный при дезинтеграции породы, имеет наивысшую марку по прочности, оцениваемую по сопротивлению как сжимающей нагрузке, так и ударной (табл. 2). Вместе с тем следует обратить внимание на значительные колебания полученных значений как рабочего индекса дробления  $W_i$ , так и предела прочности при сжатии.

Если расхождения в значениях рабочего индекса могут быть связаны с условиями эксперимента, формой и размерами исследуемых образцов, то колебания значений предела прочности при сжатии, определяемого на образцах правильной геометрической формы, объясняются только колебаниями минерального состава отдельных образцов в пределах технологической пробы. Это обстоятельство говорит о необходимости испытания значительного количества образцов для получения статистически значимых и достоверных

Таблица 3  
Результаты определения рабочего индекса дробления  $W_i$  для пробы габбро-диабазы различными методами

Методика испытаний	Рабочий индекс $W_i$ , кВт·ч/т		
	Наименьшее	Наибольшее	Среднее
Lokomo	–	–	17
Metso Minerals	16,4	24,7	20,5
Sandvik	10,4	56,9	30,4



Рис. 4. Установка для испытания на удар (Wi-Tester): а – рабочая зона; б – шкала измерения угла падения

За результат берется среднее значение по десяти параллельным опытам.

Испытание на двухмолотковом маятниковом копере (методика Metso Minerals). Испытуемый образец размером 50–75 мм кубовидной формы устанавливается на специальной подставке между молотками (рис. 3). Масса молотка – 16,93 кг. Молотки поднимают и отпускают одновременно. Высоту поднятия молотков увеличивают до тех пор, пока образец не разрушится. Рабочий индекс дробления рассчитывается как:

$$W_i = \frac{67,8H}{h\rho}, \text{ кВт}\cdot\text{ч/т},$$

где  $H$  – высота падения молотков, при которой произошло разрушение образца (показания измерительной шкалы), мм;  $h$  – толщина образца;  $\rho$  – средняя плотность, г/см<sup>3</sup>.

За результат берется среднее значение по десяти образцам.

Испытание на ударной установке Wi-Tester (методика Sandvik). Для испытаний отбирают 12 образцов размером от 55 мм до 75 мм максимально кубовидной формы. Образцы устанавливают на подставку прибора (рис. 4) и измеряют зазор между молотками. Молотки разводят до угла падения 30° и затем одновременно отпускают. После каждого удара угол падения увеличивают на 5° до разрушения образца.

Рабочий индекс дробления рассчитывается по формуле:

результатов. Выявление неоднородности прочностных свойств горных пород имеет большое значение для оперативного управления процессом дезинтеграции.

В этой связи важно отметить, что в отчетливой практике работы дробильно-сортировочных комплексов проводится оценка прочностных характеристик только конечной товарной продукции – щебня по фракциям. Прочность исходной горной породы оценивается только на стадии геолого-разведочных работ.

Во же время непостоянство прочностных свойств пород на месторождении необходимо учитывать при планировании горных работ, опережающем выборе режимных параметров дробления, прогнозной оценке качества щебня.

Для решения этих задач необходима разработка и стандартизация методик оперативного определения прочности горных пород в заводских лабораториях.

Список литературы / References

1. Napier-Munn T.J., Morrell S., Morrison R.D., Kojovic T. Mineral comminution circuits: their operation and optimization. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre. Australia, Brisbane: JKMRС. 2005, pp. 57–66.
2. Скарин О.И., Арустамян К.М. Современные методы оценки измельчаемости руд в циклах полусамозмельчения // Горный журнал. 2012. № 11. С. 6–11.
2. Skarin O.I., Arustamyan K.M. Modern estimation methods of ores crushability in the semi self crushing cycles. Gornyi Zhurnal. 2012. No. 11, pp. 6–11. (In Russian).