

ОСОБЕННОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАДИАЦИОННОЙ МОДИФИКАЦИИ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ЕГО К ОБОГАЩЕНИЮ

Виктор Иванович Ростовцев

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории обогащения полезных ископаемых и технологической экологии, тел. (383) 205-30-30, доб. 167, e-mail: benevikt@misd.ru

Ранее выполненные в ИГД СО РАН и ИЯФ СО РАН минералого-технологические исследования на примере труднообогатимой свинцово-цинковой руды крупностью -3 мм позволили получить данные о повышении селективности дезинтеграции минерального сырья и улучшении раскрытия полезных минералов за счет предварительной электронно-лучевой обработки. Цель исследований: комплексное изучение и анализ особенностей изменения прочностных свойств ядерных образцов основных горных пород – известняка, роговика и гранита – в результате их радиационной модификации обработкой пучком высокоэнергетических электронов. Выявлено, что увеличение поглощенной дозы приводит к изменению деформационно-прочностных свойств: предела прочности на сжатие, модулей деформации и упругости. Если без обработки предел прочности на одноосное сжатие для известняка составляет 49.11 МПа, то при поглощенной дозе 15 кГр – 35.24 МПа. Для гранита увеличение поглощенной дозы до 10 кГр снижает предел прочности на сжатие с 68.33 до 35.08 МПа. Приводится оценка энергозатрат на разрушение и дробление с использованием отечественного оборудования ИГД СО РАН для испытаний ядер на разрушение при одноосном нагружении. Если энергии разрушения и дробления для исходного образца гранита составляют 78.6 и 7004.2 Дж/кг, то для радиационно модифицированного – 30.6 и 4708.8 Дж/кг. Установлено, что размер частицы после дробления обработанного ядра уменьшился с 10.98 до 8.76 мм. Научная новизна заключается в установлении эффекта дальнего действия при разупрочнении минерального сырья крупностью 30-50 мм, в том числе ядер гранита цилиндрической формы диаметром 30 мм и длиной 60 мм ($D_{эф} = 43.2$ мм), в результате образующихся при торможении импульсного электронного пучка в минералах ударных волн, что может быть использовано с целью снижения расхода электроэнергии при рудоподготовке и минимизации потерь полезных компонентов при последующем обогащении.

Ключевые слова: минеральное сырье, радиационная модификация, ударные волны, прочностные свойства, оценка энергозатрат на разрушение и дробление, гранулометрический состав, технологическая схема рудоподготовки

MODIFICATION OF MINERAL RAW MATERIAL BY RADIATION PRE-TREATMENT BEFORE PROCESSING: FEATURES AND PROSPECTS

Victor I. Rostovtsev

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk 630091, Russia, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher at the Laboratory of Mineral Processing and Technology Ecology, office; +7 (383) 205 30 30, ext. 167, e-mail: benevikt@misd.ru

The earlier case-studies of rebellious lead-zinc ore with grain size of -3 mm at the Chinakal Institute of Mining and Budker Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch of the Russian Academy

of Sciences provided data on improvement of disintegration selectivity and improved dissociation of useful minerals owing to preliminary treatment by a stream of electrons. The goal of this research is the integrated analysis of the change in the strength of core samples of some rocks, such as limestone, hornfels and granite, after their modification by radiation by a stream of high-energy electrons. It is found that the increase in the absorbed radiation dose results in the change in the strength and deformation properties: ultimate compression strength, modulus of deformation and elasticity modulus. In case of limestone, the ultimate uniaxial compression without radiation treatment is 49.11 MPa and drops to 35.24 MPa at the absorbed dose of 15 kGy. In case of granite, the absorption dose of 10 kGy decreases the ultimate compression strength from 68.33 to 35.08 MPa. The energy input in fracture and crushing is estimated on the equipment designed for uniaxial loading of cores at the Chinakal Institute of Mining. The energy input in fracture and crushing make 78.6 and 7004.2 J/kg for initial granite and 30.6 and 4708.8 J/kg for granite modified by radiation. The size of particle after crushing of treated cores reduces from 10.98 to 8.76 mm. The novelty of this study is the found effect of the range coverage in weakening of minerals with grain sizes to 30–50 mm, including cylindrical granite cores with diameters of 30 mm and lengths of 60 mm (equivalent spherical diameter is 43.2 mm) due to the shock waves generated in minerals during deceleration of electrons in the stream. This effect can be utilized to reduce the energy consumption of the pre-treatment technology and to minimize mineral losses in subsequent processing.

Keywords: mineral raw material, radiation-based modification, shock waves, strength properties, estimate of energy input in fracture and crushing, grain size composition, ore pre-treatment flowchart

Введение

На современном этапе минерально-сырьевая база России и зарубежных стран представлена бедными труднообогатимыми рудами и техногенными образованиями [1–3], доля которых постоянно возрастает. Данные типы руд характеризуются сложным вещественным составом, низким содержанием ценных компонентов, тонкой вкрапленностью, вплоть до эмульсионной, и близкими физико-химическими и технологическими свойствами. Эффективная переработка таких руд возможна только на основе создания инновационных процессов комплексной и глубокой переработки с учетом последних достижений фундаментальных наук.

Следует отметить, что в настоящее время в России осуществляется переход к наилучшим доступным технологиям (НДТ), который официально стартовал в июле 2014 года с принятием Федерального закона от 21.07.2014 года № 219-ФЗ, по которому предприятия должны внедрять экономически рентабельные технологии, позволяющие минимизировать количество образующихся отходов и выбросов [4–5].

Одним из эффективных методов, позволяющих получать качественные концентраты из такого минерального сырья, является флотация. При этом важным фактором, определяющим эффективность флотационного процесса, является размер свободных зерен минеральных частиц. Увеличение крупности извлекаемых пенной флотацией частиц может повысить извлечение полезного компонента и сократить расходы на дорогостоящий процесс измельчения руды. Например, расширение диапазона крупности частиц во флотационной пульпе до

0.1 – 0.3 мм может дать экономию 30 – 50 % энергии, затрачиваемой в наиболее энергоёмком переделе обогащения – процессе измельчения [6-7].

Как указывается в [1] для процессов селективной дезинтеграции последние 25 лет в ряде стран для создания дефектов на границе срастания минералов разрабатываются энергетические методы (СВЧ, мощные наносекундные импульсы и т.д.). В этом направлении наша страна имеет приоритет, однако, до сих пор эти методы не получили промышленной реализации вследствие отсутствия достаточной инженерной проработки конструкций, адаптированных к промышленным условиям.

Среди указанных перспективным методом является воздействие потоком ускоренных электронов на минеральное сырьё [8-9]. Радиационные технологии определены мировым сообществом как потенциально прорывные в различных областях промышленного производства. В настоящее время радиационная обработка широко используется для модификации полимеров, стерилизации медицинских изделий, обеззараживания бытовых отходов, очистки стоков промышленных предприятий и дымовых газов. Достоинством воздействия потоком ускоренных электронов является наличие отечественного стандартного оборудования и комплектующих для реализации процессов обработки минерального сырья с сохранением или незначительным изменением технологических схем и оборудования обогатительных фабрик [10-11]. Цель исследований – комплексное изучение изменения прочностных свойств керновых образцов основных горных пород при их обработке пучком высокоэнергетических электронов и анализ полученных результатов для совершенствования процессов подготовки минерального сырья к обогащению. Научная новизна заключается в установлении эффекта дальнего действия при разупрочнении минерального сырья, в том числе кернов цилиндрической формы диаметром 30 мм и длиной 60 мм, в результате образующихся при торможении импульсного электронного пучка в минералах ударных волн, что может быть использовано с целью снижения расхода электроэнергии при рудоподготовке и минимизации потерь полезных компонентов при последующем обогащении.

Методы и материалы

Анализ проб минерального сырья различных месторождений показывает, что они, как правило полиминеральные и бóльшая их часть представлена породообразующими минералами и горными породами, например, такими как известняк, роговик, гранит.

Известняк – одна из самых широко распространённых осадочных горных пород. Залежи известняков составляют 19-22% от всей массы осадочных пород. Известняк является третьим по распространённости в земной коре минералом после кварца и полевого шпата. Большое количество кальцита откладывается из горячих вод в гидротермальных жилах с сульфидами, а также в эффузивных породах вместе с цеолитами, халцедоном, кварцем, баритом.

Роговики встречаются в месторождения медь-молибденовой формации, содержащей медь, молибден, золото, серебро, свинец, цинк, кобальт, висмут и ртуть (Эндыбайское, Якутия); сурьмы (Терекское, Киргизия; Сингуашань, Китай); вольфрама (Тигриное, Приморье) и других металлов и минералов.

Граниты – наиболее важные породы земной коры. Исследования гранитов представляют интерес, так как с этой горной породой связаны месторождения таких полезных элементов, как Au, Sn, W, Mo, Li, Be, Rb, Bi и др. Граниты содержат в своем составе 60-65% калиевого полевого шпата, 25-35% кварца и 5-10% слюды. Калиевый полевой шпат входит в состав многих полиметаллических руд, кварц – главная составная часть золото-, железосодержащих и других руд.

Определение физико-механических свойств горных пород осуществлялось на образцах кернов правильной цилиндрической формы в соответствии с действующими стандартами и методиками на оборудовании, прошедшем метрологическую поверку. Диаметр (d) образцов составлял порядка 30 мм; высота образцов (h) – 60 мм; отношение высоты (h) к диаметру (коэффициент формы h/d) в среднем для испытанных образцов составляло 2, что соответствует требованиям ГОСТ 21153.2-84.

Экспериментальные исследования осуществлялись с использованием комплекса оборудования ИГД СО РАН для испытаний на разрушение при одноосном нагружении с определением акустических характеристик керновых образцов. В состав комплекса входили следующие установки и оборудование:

- гидравлическая установка Института горного дела СО РАН, рассчитанная на предельную осевую нагрузку 1000 кН, с измерительной камерой, обеспечивающая следующие режимы нагружения: осевое и трехосное сжатие, растяжение и автоматическую запись в память компьютера результатов эксперимента;

- разработанный и изготовленный в ИГД СО РАН комплект оборудования с использованием сертифицированных датчиков S1802-0.05A0D4PU производства фирмы «Акустические Контрольные Системы, г. Москва» для измерения скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн;

- стенд для определения деформационных и акустических характеристик при одноосном и трехосном нагружении образцов керна, позволяющий в процессе экспериментов проводить непрерывное измерение прямым методом деформации и осуществлять запись осевой нагрузки, продольной и поперечных деформаций между торцами образца и в средней его части. Для этого в состав стенда входил преобразователь линейных перемещений ЛИР – 940 – РСІ – 9pin – ГО фирмы ОАО «СКБ ИС».

Определение деформационных свойств горных пород производилось согласно требованиям [12–15].

Обработка подготовленных кернов образцов горных пород осуществлялась пучком ускоренных электронов на промышленном ускорителе ИЛУ-6 в Институте ядерной физики СО РАН в соответствии с заданными дозами при энергии электронов 2.4 МэВ.

Результаты и их обсуждение

Основные результаты исследований по изучению влияния радиационной модификации обработкой ускоренными электронами кернов горных пород на их механические и акустические свойства приведены в таблицах 1-4 и на рисунках 1-3.

Таблица 1

Результаты механического и динамического тестирования кернов известняка, роговика и гранита, обработанных потоком ускоренных электронов

Номер образца	Поглощенная доза, кГр	Размер образца, $d \times h$, мм	Механические свойства		
			Предел прочности на одноосное сжатие, σ^e , МПа	Упругие статические характеристики	
				Модуль деформации E , ГПа	Коэффициент Пуассона ν
Известняк ($\rho = 2.68 \text{ г/см}^3$)					
0	0	29.5×60.2	49.11	13.20	0.17
5	5	29.5×60.5	76.61	13.32	0.22
10	10	29.5×60.5	38.24	7.44	0.26
15	15	29.5×60.4	35.24	10.43	0.38
Роговик ($\rho = 2.66 \text{ г/см}^3$)					
0	0	29.5×60.3	123.15	29.70	0.175
5	5	29.4×60.3	115.20	22.72	0.18
10	10	29.4×60.3	78.97	9.71	0.18
15	15	29.5×60.2	135.89	28.64	0.19
Гранит ($\rho = 2.45 \text{ г/см}^3$)					
2	0	29.5×61.3	68.33	13.19	0.19
5	5	29.6×56.9	67.98	9.34	0.19
8	10	29.6×60.0	35.08	7.04	0.16
9	15	29.6×60.0	57.53	10.34	0.20

Анализ данных таблице 1 показывает, что обработка потоком ускоренных электронов кернов известняка, роговика и гранита изменяет их механические свойства. Увеличение поглощенной дозы приводит к снижению: предела прочности на сжатие, модулей деформации и упругости. Если без обработки предел прочности на сжатие для известняка составляет 49.11 МПа, то при поглощенной дозе 15 кГр — 35.24 МПа. Значения коэффициентов Пуассона при увеличении поглощенной дозы возрастают. Без обработки его значение составляет 0.17, а при поглощенной дозе 15 кГр — 0.38. Аналогичная закономерность наблюдается для роговика и гранита.

Результаты, приведенные в таблице 2 показывают, что ускоренные электроны оказывают влияние на акустические свойства известняка, роговика и гранита. Для гранита с увеличением величины поглощенной дозы до 15 кГр скорости продольных и поперечных волн сначала уменьшаются, а затем увеличиваются. Для исходного образца зерна гранита скорости продольных и попереч-

ных волн равны 3747 и 2287 м/с, для обработанного при дозе 5 кГр образца они соответственно равны 3543 и 2142 м/с. При дозе 15 кГр они равны 3905 и 2339 м/с.

Таблица 2

Результаты определения акустических свойств образцов кернов известняка, роговика и гранита, обработанных потоком ускоренных электронов

Номер образ-ца	Погло-щенная доза, кГр	Размер образца, $d \times h$, мм	Атмосферные условия			
			Скорость волн, м/с		Модуль упругости, ГПа	Кэффи-циент Пуассона
			продольных	поперечных		
Известняк ($\rho = 2.68 \text{ г/см}^3$)						
0	0	29.5×60.2	5021	2657	49.30	0.31
5	5	29.5×60.5	4605	1992	29.50	0.38
10	10	29.5×60.5	4386	1992	29.21	0.37
15	15	29.5×60.4	4485	1982	28.62	0.38
Роговик ($\rho = 2.66 \text{ г/см}^3$)						
0	0	29.5×60.3	5601.3	3030.7	63.62	0.287
5	5	29.4×60.3	5339.7	2972.7	60.62	0.277
10	10	29.4×60.3	5345.7	3012.0	61.81	0.267
15	15	29.5×60.2	5233.3	2971.3	59.52	0.260
Гранит ($\rho = 2.45 \text{ г/см}^3$)						
2	0	29.5×61.0	3747	2287	32.01	0.20
5	5	29.6×56.9	3543	2142	30.29	0.27
8	10	29.6×60.0	4054	2376	37.98	0.26
9	15	29.6×60.0	3905	2339	37.49	0.26

Из таблиц 1–2 также видно, что изменение основных деформационно-прочностных характеристик исследованных горных пород связано с радиационной модификацией их структуры под действием обработки потоком ускоренных электронов. Этот вывод следует и из анализа образцов кернов известняка и гранита после разрушения, показанных на рисунках 1 и 2. В результате разрушения образцов кернов известняка и гранита, обработанных потоком ускоренных электронов, одноосным сжатием образуется в основном большее количество частиц по сравнению с исходным образцом. Если из исходных образцов известняка и гранита образуются только 2 частицы, то из обработанных ускоренными электронами – от 5 до 10 частиц (рисунки 1 и 2).

Установленная на примере различных горных пород возможность их разупрочнения при воздействии ускоренными электронами может быть использована с целью снижения расхода электроэнергии при рудоподготовке минерального сырья, содержащего в своем составе исследованные горные породы, и минимизации потерь полезных компонентов при последующем обогащении.

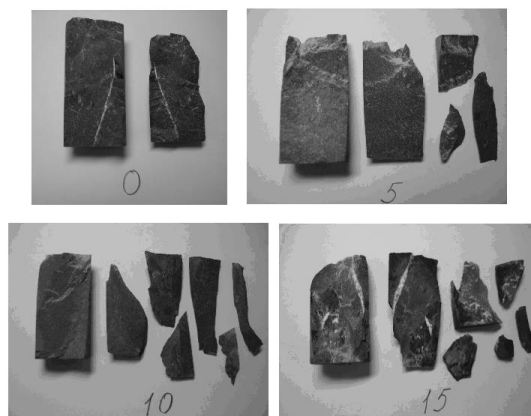


Рис. 1. Фотографии образцов керна известняка после разрушения:
0 – исходный образец, 5, 10 и 15 – образцы керна, обработанные потоком ускоренных электронов при дозах 5, 10 и 15 кГр



Рис. 2. Фотографии образцов керна гранита после разрушения:
2 – исходный образец, 5 и 9 – образцы керна, обработанные потоком ускоренных электронов при дозах 5 и 15 кГр

В работе [16] показано, что выбор оптимальной схемы рудоподготовки базируется на экспериментальном определении прямых прочностных показателей минерального сырья, косвенных показателей в сравнении с эталоном или нахождении удельных затрат электроэнергии, к которым сводятся все зарубежные методы.

Далее приводится оценка энергозатрат на разрушение и дробление на примере гранита, в том числе радиационно модифицированного пучком ускоренных электронов, с использованием отечественного оборудования ИГД СО РАН для испытаний кернов на разрушение при одноосном нагружении. Энергии разрушения и дробления определялись по экспериментально полученным диаграммам

усилие–продольная деформация. Пример такой диаграммы для исходного образца гранита приведен на рисунке 3.

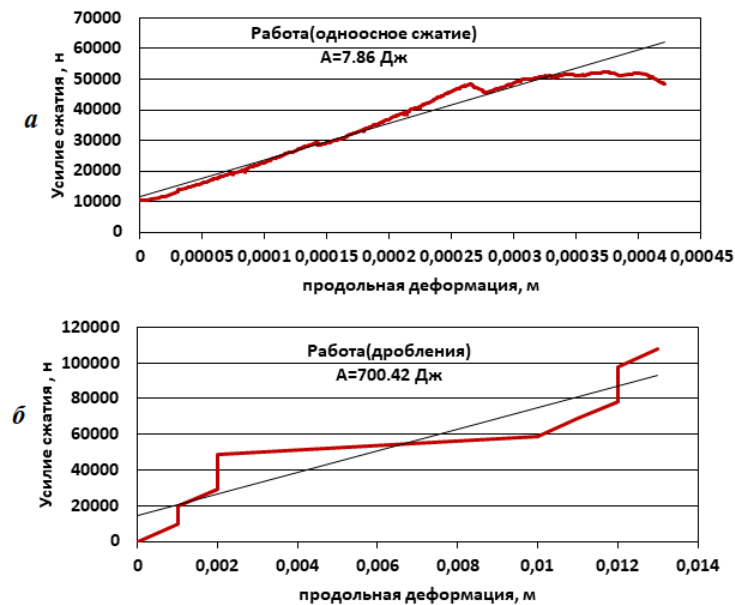


Рис. 3. Диаграммы усилие–продольная деформация для исходного образца гранита в виде зерна цилиндрической формы диаметром 30 мм и длиной 60 мм (масса образца ~100 г):

a – при разрушении одноосным сжатием, *б* – при дроблении

Результаты исследований по влиянию радиационной модификации гранита обработкой ускоренными электронами на энергоемкость процессов его разрушения и дробления приведены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты исследований энергий разрушения и дробления ядер гранита, обработанных потоком ускоренных электронов

Доза, кГр	Предел прочности на сжатие, МПа	Энергия, Дж/кг		Средний размер частиц дробленного материала, мм
		Разрушения	Дробления	
0	68.33	78.6	7004.2	10.98
5	67.98	63.6	5297.4	8.96
10	35.08	30.6	4708.8	8.76
15	57.33	74.0	5297.4	11.55
20	86.29	226.2	7848.0	11.80

Расчет среднего размера дробленной частицы D_{cp} производился на основании экспериментальных данных по гранулометрическому составу дробленного материала (таблица 4) по известной формуле:

$$D_{CP} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i \cdot P_i}{100},$$

где d_i – средняя крупность дробленых частиц в i -ом классе, мм;
 P_i – содержание i -го класса, %.

Таблица 4

Гранулометрический состав дробленного материала,
 полученного при одноосном статическом сжатии обработанных
 потоком ускоренных электронов кернов гранита после их разрушения

Поглощенная доза, кГр	Гранулометрический состав дробленного материала, %				
	<2 мм	2–5 мм	5–7 мм	7–12 мм	>12мм
0	24,0	12,5	12,5	25,0	26,0
5	27,0	15,3	14,3	26,4	17,0
10	21,3	14,3	13,7	22,0	28,7
15	22,3	14,3	12,7	20,3	30,4
20	25,0	16,5	17,0	24,0	17,5

Так как разрушались керны цилиндрической формы диаметром 30 мм и длиной 60 мм, то в расчетах использовано эквивалентное преобразование цилиндра в сферу. Учитывая равенство объемов цилиндра $V_{Ц}$ и сферы $V_{СФ}$:

$$V_{Ц} = V_{СФ} = \pi r_{Ц}^2 h_{Ц} = \frac{4}{3} \pi r_{СФ}^3 = 3.14 \cdot 15^2 \cdot 60 = 13500 \pi \text{ мм}^3,$$

находим радиус $r_{ЭСФ}$ и диаметр $D_{ЭСФ}$ эквивалентной сферы:

$$r_{ЭСФ} = \sqrt[3]{\frac{3V_{Ц}}{4\pi}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 13500 \pi}{4\pi}} = 21,6 \text{ мм}, \quad D_{ЭСФ} = 2 \cdot r_{ЭСФ} = 2 \cdot 21,6 = 43,2 \text{ мм}.$$

Данные таблиц 3 и 4 показывают, что использование ускоренных электронов для обработки кернов гранита позволяет не только снижать энергозатраты на их разрушение и дробление, но и изменять гранулометрический состав дробленного материала. Установленная на примере гранита возможность его разупрочнения при воздействии ускоренными электронами может быть использована с целью снижения расхода электроэнергии при рудоподготовке минерального сырья, содержащего породную основу в виде гранита, известняка или других компонентов, например, кварца, хлорита, полевого шпата, роговика.

Установленные для известняка, роговика и гранита закономерности при их разрушении после воздействия потоком ускоренных электронов связаны со спецификой взаимодействия электронов с твердым веществом [17, 18]. Пучок электронов порождает точечные дефекты в минералах за короткий промежуток времени $\sim 10^{-11}$ с, в течение которого появляются вакансии и равное им число дис-

лоцированных атомов. Равновесие между ними достигается образованием постоянных кластеров или исчезновением неустойчивых повреждений диффузионным переносом. При обработке пучком электронов вносится определенный заряд, что приводит к зарядке поверхности и появлению потенциала. Во время облучения под действием электрического поля дефекты непрерывно мигрируют, объединяются и движутся в поле между дислокациями и границами раздела. Затем, достигая предельной концентрации, вакансии объединяются в каверны. Последние являются дефектами, которые становятся местами нарушения целостности материала. Этот факт подтверждает падение скорости волн в образцах известняка, роговика и гранита после обработки ускоренными электронами (таблицы 1 и 2). Кроме того, за счет воздействия ускоренных электронов в диэлектриках накапливается местный заряд с образованием электрического поля [19]. Вследствие этого облегчаются перемещения дислокаций в минералах и интенсифицируются процессы их разрушения. Каверны, электрической пробой и скопление дислокаций по границам минералов приводят к появлению микротрещин и потере механической прочности.

Особенностью радиационной модификации минерального сырья крупностью более 30 мм является возможность направленно изменять его структурно-фазовое состояние и физические свойства [20].

Научная новизна заключается в установлении эффекта дальнего действия при разупрочнении минерального сырья крупностью 30-50 мм, в том числе кернов гранита цилиндрической формы диаметром 30 мм и длиной 60 мм ($D_{ЭСФ} = 43.2$ мм), в результате образующихся при торможении импульсного электронного пучка в минералах ударных волн.

Заключение

Проведены испытания образцов кернов радиационно модифицированных горных пород с определением механических и акустических свойств образцов кернов в атмосферных условиях в зависимости от осевого напряжения сжатия.

Установлено, что обработка потоком ускоренных электронов кернов известняка, роговика и гранита изменяет их механические и акустические свойства. Увеличение поглощенной дозы приводит к снижению: предела прочности на сжатие, модулей деформации и упругости. Если без обработки предел прочности на сжатие для известняка составляет 49.11 МПа, то при поглощенной дозе 15 кГр — 35.24 МПа. Значения коэффициентов Пуассона при увеличении поглощенной дозы возрастают. Без обработки его значение составляет 0.17, а при поглощенной дозе 15 кГр — 0.38. Аналогичная закономерность наблюдается для роговика и гранита. Для исходного образца керна гранита скорости продольных и поперечных волн равны 3747 и 2287 м/с, для обработанного при дозе 5 кГр образца они соответственно равны 3543 и 2142 м/с. При дозе 15 кГр они равны 3905 и 2339 м/с.

Изменение основных деформационно-прочностных характеристик исследованных горных пород связано с радиационной модификацией их структуры

под действием обработки потоком ускоренных электронов. Этот вывод следует и из анализа образцов кернов известняка и гранита после разрушения. Если из исходных образцов известняка и гранита образуются только 2 частицы, то из обработанных ускоренными электронами – от 5 до 10 частиц.

Показано, что оптимальная доза радиационной обработки ускоренными электронами для разупрочнения гранита и содержащего его минерального сырья равна 10 кГр. При такой обработке предел прочности на сжатие снижается с 68.33 до 35.08 МПа. Приводится оценка энергозатрат на разрушение и дробление на примере гранита с использованием отечественного оборудования ИГД СО РАН для испытаний кернов на разрушение при одноосном нагружении. Если энергии разрушения и дробления для исходного образца гранита составляют 78.6 и 7004.2 Дж/кг, то для радиационно модифицированного – 30.6 и 4708.8 Дж/кг. Установлено, что средний размер дробленной частицы после дробления радиационно модифицированного керна гранита уменьшился с 10.98 до 8.76 мм.

С учетом полученных результатов разработана и рекомендована технологическая схема рудоподготовки и обогащения руд с использованием радиационной модификации их свойств путем обработки импульсным пучком электронов с энергией 2.4 МэВ и частотой 25 Гц, позволяющая снизить расход электроэнергии при рудоподготовке и минимизировать потери полезных компонентов при последующем обогащении. Достоинством новой технологии является наличие отечественного стандартного оборудования и комплектующих для ее реализации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чантурия В. А. Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки минерального сырья сложного вещественного состава / Инновационные процессы комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения – 2020). – Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2020. – С. 3–4.
2. Рыжова Л. П., Салей А. У. Проблемы и перспективы развития минерально-сырьевой базы рудных месторождений в России и за рубежом / Вестник науки и образования. — 2018. — Т. 1. — № 5(41). — С. 46–49.
3. Ежов А. И. Оценка техногенного сырья в Российской Федерации (твердые полезные ископаемые) / Горные науки и технологии. — 2016. — № 4. — С. 62–72.
4. Федеральный закон от 21.07.2014 г. № 219-ФЗ (ред. от 26.07.2019 г.) «О внесении изменений в Федеральный закон "Об охране окружающей среды" и отдельные законодательные акты Российской Федерации».
5. Распоряжение Правительства РФ от 22 декабря 2018 г. № 2914-р О стратегии развития минерально-сырьевой базы РФ до 2035 г.
6. Tabosa E., Runge K., and Duffy K-A. Strategies for increasing coarse particle flotation in conventional flotation cells / Proc. The 6th International Flotation Conference. Cape Town, South Africa, 2013.
7. Кондратьев С. А., Мошкин Н. П. Взаимодействие минеральной частицы со свободным пузырьком воздуха в жидкости / Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2020. – № 6. С. 125–135.
8. Кондратьев С. А., Ростовцев В. И., Коваленко К. А. Развитие экологически безопасных технологий комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья / Горный журнал. – 2020. – № 5. С. 39-46.

9. Чантурия В. А., Бунин И. Ж. Нетрадиционные высокоэнергетические методы дезинтеграции и вскрытия тонкодисперсных минеральных комплексов / Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2007. – № 3. С. 107–128.
10. Куксанов Н. К., Салимов Р. А., Брызгин А. А. Ускорители электронов для промышленного применения, разработанные в ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН / Успехи физических наук. – 2018. – Т. 188. – № 6. – С. 672–685.
11. Безуглов В. В., Брызгин А. А., Власов А. Ю., Воронин Л. А., Коробейников М.В. и др. Радиационные технологии и оборудование / Вопросы атомной науки и техники. Техническая физика и автоматизация. – М.: АО «НИИТФА», 2018. – Вып. 83. – С. 4–21.
12. ГОСТ 28985–91 Породы горные. Методы определения деформационных характеристик при одноосном сжатии.
13. ГОСТ 21153.2–84 Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии.
14. ГОСТ 21153.7–75 Породы горные. Метод определения скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн.
15. Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1988. – 712 с.
16. Газалеева Г. И., Братыгин Е. В., Курков А. В., Рогожин А. А. К выбору критериев оптимальных схем рудоподготовки / Ресурсосбережение и охрана окружающей среды при обогащении и переработке минерального сырья. Материалы Международной конференции «Плаксинские чтения-2016», г. Санкт-Петербург, 26–30 сентября 2016 г. – Москва: АО «Издательский дом «Руда и Металлы», 2016. – С. 14–17.
17. Vochkarev G. R., Chanturija V. A., Vigdergaus V. E., Lunin V. D., Veigelt Yu. P., Rostovtsev V. I., Voronin A. P., Auslender V. L., and Polyakov V. A. Prospects of electron accelerators used for realizing effective low-cost technologies of mineral processing / Proceedinds of the XX International Mineral Processing Congress: 21-26 September 1997, Aachen, Germany, Clausthal-Zellerfeld, GDMB, 1997, Vol. 1. – P. 231–243.
18. Брызгин А. А., Коробейников М. В., Кондратьев С. А., Ростовцев В. И. Эффекты дальнего действия при взаимодействии электронного пучка с кристаллическими веществами // Труды XXIX Международной конференции «Радиационная физика твердого тела». Севастополь: Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий. – 2019. – С. 55–64.
19. Чантурия В. А., Маляров П. В. Обзор мировых достижений и перспективы развития техники и технологии дезинтеграции минерального сырья при обогащении полезных ископаемых / Современные методы технологической минералогии в процессах комплексной и глубокой переработки минерального сырья. Материалы Международного совещания «Плаксинские чтения-2012», г. Петрозаводск, 10–14 сентября 2012 г. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2012. – С. 3–10.
20. Углов В.В. Радиационные процессы и явления в твердых телах. – Минск, Высш. шк., 2016. – 188 с.

© В. И. Ростовцев, 2021