Исследование свойств горных пород при дроблении и измельчении в механических мельницах

Владимир Иванович ГОЛИК^{1*}
Хамби Хадзимурзович КОЖИЕВ^{1**}
Максим Александрович ГОЛОДОВ^{2***}
Виталий Николаевич АРМЕЙСКОВ^{2****}

¹Северо-Кавказский горно-металлургический институт (ГТУ), Владикавказ, Россия

² ИСОиП (филиал) ДГТУ, Шахты, Россия

Аннотация

Актуальность и цель. Системный кризис в горнодобывающей отрасли ослабил обеспеченность промышленности разведанными запасами основных видов полезных ископаемых, что актуализировало поиск технологических решений с целью восстановления утраченного потенциала минерально-сырьевой базы.

Методология. Теоретические исследования движения мелющей загрузки в помольных камерах планетарных мельниц опираются на постулат об эквивалентности форм движения загрузки в мельницах. Измельчительное оборудование нового технического уровня совершенствуется в направлении повышения интенсивности воздействия мелющих тел на измельчаемый материал. Целью исследования является повышение интенсивности воздействия мелющих тел на измельчаемое минеральное сырье при минимизации энергоемкости процессов переработки. Цель достигается путем комплексирования аналитических и экспериментальных исследований с элементами инженерного прогнозирования и моделирования полученных результатов.

Результаты и область применения. Приведены результаты исследования свойств горных пород и изменения их в результате дробления и измельчения в механических мельницах. Систематизированы сведения об устройствах для измерения параметров ударных импульсов и практики их применения на примере геологических разностей пород. Стеновыми исследованиями подтвержден обоснованный теоретически феномен гашения амплитуды ударного импульса. Детализирована роль процессов дробления и измельчения в мельницах в технологической цепи безотходной утилизации хвостов обогащения химически вскрываемых металлических руд, преимущественно скальных месторождений.

Выводы. Методы повышения интенсивности воздействия мелющих тел на измельчаемое минеральное сырье при одной и той же энергоемкости процессов переработки могут быть использованы при модернизации технологий разработки месторождений полезных ископаемых.

Ключевые слова: запасы, полезные ископаемые, мелющая загрузка, мельница, энергоемкость, исследование, технология.

Введение

Структура горных пород определяется размером, формой и характером срастания минералов, а также степенью кристалличности вещества от полнокристаллической из кристаллических зерен минералов до стекловатой и вкрапленной.

Среди осадочных пород выделяют структуры от крупнообломочного размера более 100 мм до тонкообломочного размера менее 0,01 мм.

Такое разнообразие затрудняет обработку горных пород на стадии подготовки к их использованию в производстве и обуславливает необходимость дифференциации и классификации по виду, структуре, размеру, технологичности и другим признакам.

Поэтому совершенствование методов подготовки горных пород является темой научных исследова-

ний, например, в ходе переработки в камерах механических мельниц.

Методы изучения геологии рудных и нерудных месторождений играют важную роль в создании и упрочнении современной материально-сырьевой базы мира. Они лежат в основе принимаемых технологических решений при освоении сырьевых ресурсов и гуманизации горного производства.

Смена хозяйственного уклада в конце прошлого века и последующий системный кризис в горнодобывающей отрасли России ослабили обеспеченность базовых отраслей экономики разведанными запасами основных видов полезных ископаемых и обострили проблемы минерально-сырьевой базы металлургии и смежных отраслей.

✉ v.i.golik@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1181-8452>

* hambi@list.ru

** dzapa64@yandex.ru

*** dzboris@gmail.com

Рисунок 1. Способы измельчения минерального сырья
Figure 1. Methods of grinding mineral raw materials

По мере истощения геологических запасов месторождений полезных ископаемых приоритетными становятся техногенные источники – хвосты переработки ранее добытого сырья.

Вовлечение в хозяйственный оборот техногенных месторождений делает актуальными процессы дробления, измельчения и классификации хвостов переработки с целью разрушения плотных лежалых компонент хранилищ путем удара, сжатия, сдвига, раскалывания и истирания.

Получают развитие исследования роли подготовки некондиционного сырья для дальнейшего использования в производстве товарной продукции [1, 2].

Использование некондиционных для традиционной технологии переработки минеральных ресурсов месторождений рассматривается как одна из реальных возможностей расширения сырьевой базы горнорудных предприятий [3–5].

Получают развитие представления о теории и практике дробления и измельчения пород и других материалов в механических мельницах [6–8], среди которых выделяются исследования движения мелющей загрузки и повышение эффективности оборудования для тонкого измельчения горных пород как определяющие энергоемкость дробления и измельчения материалов, как условие эффективности дальнейшего использования продуктов подготовки в процессах добычи и переработки минерального сырья, а также для минимизации негативного влияния горного производства на окружающую природную среду [9–11].

Результаты и их применение

Эффективность операций по обеспечению нормативной крупности минерального сырья – дробления и измельчения – определяется его параметрами, основными из которых являются дробимость или измельчаемость материала.

Дробилки характеризуются ограничением по времени пребывания материала в дробилке, поэтому для получения крупности минеральных частиц 5–20 мм минеральное сырье измельчают одним из способов в мельницах соответствующего типа (рис. 1).

Обеспечение нормативной крупности минеральных частиц происходит путем измельчения с использованием барабанных мельниц самоизмельчения – стержневых, шаровых, галечных, конусных и др. Для сверхтонкого измельчения применяют вертикальные мельницы с перемешиванием дробящей среды.

Требование к крупности минерального сырья стало приоритетным при использовании основных перспективных горных технологий современности: с заполнением технологических пустот бетонными смесями и с выщелачиванием металлов реагентами.

При прочих равных условиях использование классифицированных по крупности компонент бетонной смеси увеличивает ее прочность примерно на 15–30 %.

Только соблюдение обусловленного геолого-минералогическими условиями размера рудного куска обеспечивает возможность извлечения металлов при кучном выщелачивании растворами реагентов. При этом и переизмельчение, и недоизмельчение исходного материала может сделать технологию неэффективной.

В помольной камере все компоненты мелющей загрузки действуют независимо друг от друга, а интегральная характеристика является средневзвешенным значением характеристик всех компонент.

Для определения интегральных плотностных характеристик измельчаемых пород различной крупности достаточно определить характеристики каждой разновидности пород дифференцированно и найти их средневзвешенное значение.

Разрушение пород в наиболее слабом месте происходит независимо от состояния других компонент мелющей загрузки или под воздействием растягивающих напряжений в виде отрыва, или вследствие касательных напряжений в виде сдвига. Если процесс протекает с контактированием элементов загрузки, приоритетное значение приобретает фактор трения участвующих в измельчении тел.

При измельчении горные породы подвергаются воздействию различных нагрузок в режимах нагружения – от статического до импульсного.

Рисунок 2. Трехкомпонентный радиоакселерометр: 1 – корпус; 2 – крышка; 3 – виброизмельчительный блок; 4 – емкостный акселерометр; 5 – микросхема; 6 – передающая антенна; 7 – канавки; 8 – элементы питания

Figure 2. Three-component radio accelerometer (TPA): 1 – housing; 2 – cover; 3 – vibration milling unit; 4 – capacitive accel erometer; 5 – microcircuit; 6 – transmitting antenna; 7 – grooves; 8 – batteries

Любые процессы нагружения являются динамическими в различной степени, причем главной характеристикой режима нагружения является скорость относительной деформации в каждой точке мелющей загрузки.

Для измерения деформационно-прочностных характеристик с увеличением величины и скорости приложения нагрузок наиболее приемлемы такие методы количественной оценки, которые позволяют изменять скорость деформирования пород при режимах от статического до динамического.

В диапазоне динамических скоростей деформаций в помольных камерах применяют ударный способ нагружения. Значение нагрузки, зарегистрированное при разрушении породы, считается пределом ее прочности при сжатии. С увеличением скорости

деформирования пределы прочности пород и значения модуля упругости возрастают.

Определение динамических характеристик породных компонент мелющей загрузки является наиболее трудным элементом исследования свойств пород.

В рамках программы определения динамических параметров мелющих тел используется устройство для измерения параметров ударных импульсов, в конструкцию которого входят фиксирующие ударные импульсы измерительные модули.

Модуль выполнен на базе емкостного акселерометра, который содержит чувствительный элемент, усилитель-преобразователь и элементы выводного монтажа. Рабочим узлом акселерометра является чувствительный элемент. Подвижная часть чувствительного элемента акселерометра представляет собой инерционную массу, подвешенную на четырех упругих подвесах, выполненных как одно целое с основанием. Обкладки емкостного датчика перемещения образованы напылением слоя алюминия на стеклянной пластине, что обеспечивает чувствительному элементу прочность. Выводы чувствительного элемента соединены с усилителем-преобразователем через вводы корпуса (рис. 2).

При статическом положении трехкомпонентного радиоакселерометра расстояние между пластинами емкостных акселерометров остается незначительным. Проходящий через акселерометры и включенные в цепь параллельно катушки индуктивности сигнал усиливается на микросхемах и передается через антенны в эфир. На торце помольной камеры закреплены приемные антенны, каждая из которых связана с принимающими сигнал селективными микровольтметрами. Через АЦП сигнал передается на запоминающее устройство.

При включении мельницы ТРА соударяется с мелющими телами, расстояние между пластинами емкостных акселерометров изменяется, что сказывается на частоте передаваемого в эфир сигнала.

Для исследования свойств горных пород в качестве исходного материала был взят щебень фракции –20 мм. Результаты анализа его гранулометрического состава с дифференциацией фракций по крупности систематизированы в табл. 1.

Таблица 1. Гранулометрический состав исходного материала
Table 1. Granulometric composition of the starting material

Проба	Распределение материала по фракциям, %			
	+5 мм	3–5 мм	1–3 мм	–1 мм
1	0	2,5	2,5	95
2	5	5,0	15	75
3	10	10,0	20	60
4	20	20,0	20	40
5	25	25,0	15	35
6	30	30,0	15	25
7	40	30,0	10	20
8	50	25,0	20	15
9	60	15,0	15	10
10	70	10,0	5	5

Таблица 2. Величина удельной энергии образования новой поверхности
Table 2. Value of the specific energy of the formation of a new surface

Вид материала	Энергия, Дж/м ²	Вид материала	Энергия, Дж/м ²
Гранит	140	Руда	100
Мрамор	135	Базальт	150
Известняк	95	Песчаник	70
Фосфаты	90	Глина	55
Кварцевый песок	110	Гипс	45
Каменный уголь	80	Мел	45
Древесный уголь	60	Доломит	90

Рисунок 3. Место процесса измельчения в технологической цепи
Figure 3. Place of the grinding process in the technological chain

На величину удельной энергии образования новой поверхности при прочих равных условиях решающее влияние оказывает размер частиц разрушаемого материала (табл. 2).

Определение коэффициента трения покоя между слоями шаров в помольной камере осуществлено на стенде. Между слоями шаров в помольной камере барабанной мельницы при медленном повороте помольной камеры фиксировалась величина угла поворота мельницы в момент проскальзывания слоя относительно поверхности помольной камеры. Коэффициент трения f связан с углом поворота камеры φ :

$$f = \operatorname{tg} \varphi$$

В качестве исследуемого материала использованы известняковый и гранитный щебень,

фосфоритная и известняковая мука и древесный уголь. Целью исследования была количественная оценка влияния свойств измельчаемого материала на величину коэффициента трения, в частности, зависимость коэффициента трения от крупности измельчаемого материала.

Зависимость коэффициента трения от вида материалов при разности скоростей шара и проскальзывания описывается уравнением:

$$\mu = f(\omega R - \dot{\varphi}(R - r)).$$

Исследованием на стенде подтвержден обоснованный теоретически феномен гашения амплитуды ударного импульса. При обработке мягких материалов их демпфирующие свойства проявляются сильнее. Если взаимодействие ударной волны с материалом

продолжается в течение большего времени, по причине демпфирующих свойств материала амплитуда ударного импульса уменьшается, и разрушения материала до заданного размера не происходит. Оптимизация режима измельчения по критерию демпфирования амплитуды ударных импульсов является резервом снижения энергоемкости процесса измельчения.

Процессы дробления и измельчения в мельницах являются основными в технологической цепи безотходной утилизации хвостов обогащения химически вскрываемых руд (рис. 3).

Полученные результаты согласуются с выводами специалистов данного направления горного производства [12–15] и могут быть востребованы работниками смежных отраслей народного хозяйства.

Заключение

В процессе восстановления ослабленной минерально-сырьевой базы промышленности могут быть востребованы новые данные о методах повышения интенсивности воздействия мелющих тел на измельчаемое минеральное сырье при одной и той же энергоемкости процессов переработки.

Свойства горных пород могут корректироваться в ходе дробления и измельчения в механических мельницах.

Роль процессов дробления и измельчения в технологической цепи безотходной утилизации хвостов обогащения химически вскрываемых руд повышается при освоении новых перспективных технологий разработки месторождений полезных ископаемых.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голик В. И., Разоренов Ю. И., Страданченко С. Г., Хашева З. М. Принципы и экономическая эффективность комбинирования технологий добычи руд // Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов. 2015. Т. 326. № 7. С. 6–14.
2. Golik V. I., Gabaraev O. Z., Maslennikov S. A., Khasheva Z. M., Shulgaty L. P. The provision of development conversion perspectives into underground one for Russian iron ore deposits development // The Social Sciences (Pakistan). 2016. Т. 11. № 18. С. 4348–4351.
3. Каплунов Д. Р., Рыльникова М. В., Радченко Д. Н. Расширение сырьевой базы горнорудных предприятий на основе комплексного использования минеральных ресурсов месторождений // Горный журнал. 2013. № 12. С. 29–33.
4. Дзапаров В. Х., Харебов Г. З., Стась В. П., Стась П. П. Исследование сухих строительных смесей на основе отходов производства для подземного строительства // Сухие строительные смеси. 2020. № 1. С. 35–38.
5. Vrancken C., Longhurst P. J., Wagland S. T. Critical review of real-time methods for solid waste characterisation: Informing material recovery and fuel production // Waste Management. 2017. Vol. 61. P. 40–57. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.01.019>
6. Богданов В. С., Воробьев Н. Д. Кинематика шаровой загрузки в барабанных мельницах с наклонными межкамерными перегородками // Известия вузов Горный журнал. 1985. № 16. С. 84–96.
7. Петров В. А., Андреев Е. Е., Биленко Л. Ф. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. М.: Недра, 1990. 301 с.
8. Сыса А. Б. О выборе рациональных направлений развития измельчительного оборудования // Известия вузов. Цветная металлургия. 1994. № 3. С. 67–75.
9. Дмитрак Ю. В., Шишканов К. А. Разработка вероятностной кинематической модели мелющих тел в помольной камере вибрационной мельницы // ГИАБ. 2010. № 12. С. 302–308.
10. Дмитрак Ю. В. Теория движения мелющей загрузки и повышение эффективности оборудования для тонкого измельчения горных пород: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М.: МГГУ, 2000. 44 с.
11. Дмитрак Ю. В., Вержанский А. П., Дзюбенко М. В., Новиков А. М. Устройство для приема информации по телефонным линиям: пат. 2013879. Рос. Федерация; № 5062344/09П; заявл. 16.09.92; опубл. 30.05.94. Бюл. № 10.
12. Габараев О. З., Дмитрак Ю. В., Дребенштедт К., Савелков В. И. Закономерности взаимодействия разрушенных геоматериалов и рудовмещающего массива при отработке подработанных вкрапленных руд // Устойчивое развитие горных территорий. 2017. Т. 9. № 4 (34). С. 406–413.
13. Ben-Awuah E., Richter O., Elkington T., Pourrahimian Y. Strategic mining options optimization: Open pit mining, underground mining or both // International Journal of Mining Science and Technology. 2016. Vol. 26. Issue 6. P. 1065–1071.

Статья поступила в редакцию 2 марта 2021 года

Research of the properties of rocks during fragmenting and crushing in mechanical mills

Vladimir Ivanovich GOLIK^{1*}

Khambi Khadzimurzovich KOZHIEV^{1***}

Maksim Aleksandrovich GOLODOV^{2***}

Vitaliy Nikolaevich ARMEISKOV^{2****}

¹North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia

²ISOiP (Branch) of DGTU, Shakhty, Russia

Abstract

Relevance and purpose. The systemic crisis in the mining industry has weakened the provision of the industry with proven reserves of the main types of minerals, which has made the search for technological solutions in order to restore the lost potential of the mineral resource base.

Methodology. Theoretical studies of the movement of the grinding charge in the grinding chambers of planetary mills are based on the postulate of the equivalence of the forms of movement of the charge in mills. Grinding equipment of a new technical level is being improved in the direction of increasing the intensity of the effect of grinding bodies on the crushed material. The aim of the study is to increase the intensity of the impact of grinding bodies on the crushed mineral raw materials while minimizing the energy consumption of processing processes. The goal is achieved by integrating analytical and experimental studies with elements of engineering forecasting and modeling of the results.

Results and scope. The results of studying the properties of rocks and their changes as a result of crushing and grinding in mechanical mills are presented. Information about devices for measuring the parameters of shock pulses and the practice of their application is systematized on the example of geological differences of rocks. Bench studies have confirmed the theoretically substantiated phenomenon of shock pulse amplitude suppression. The role of the processes of crushing and grinding in mills in the technological chain of waste-free utilization of the tailings of the concentration of chemically exposed ores is detailed.

Conclusions. The phenomenon of increasing the intensity of the impact of grinding bodies on the crushed mineral raw materials with the same energy consumption of processing processes can be used in the modernization of technologies for the development of mineral deposits.

Keywords: reserves, minerals, grinding charge, mill, energy intensity, research, technology.

REFERENCES

1. Golik V. I., Razorenov Yu. I., Stradanchenko S. G., Hasheva Z. M. 2015, Principles and economic efficiency of combining ore mining technologies. *Izvestiya TPU. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources], vol. 326, no. 7, pp. 6–14. (In Russ.)
2. Golik V. I., Gabaraev O. Z., Maslennikov S. A., Khasheva Z. M., Shulgaty L. P. 2016, The provision of development conversion perspectives into underground one for Russian iron ore deposits development. *The Social Sciences (Pakistan)*, vol. 11, no. 18, pp. 4348–4351.
3. Kaplunov D. R., Rynikova M. V., Radchenko D. N. 2013, Expansion of the raw material base of mining enterprises based on the integrated use of mineral resources of deposits. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], no. 12, pp. 29–33. (In Russ.)
4. Dzaparov V. Kh., Kharebov G. Z., Stas' V. P., Stas' P. P. 2020, Research of dry construction mixtures based on industrial waste for underground construction. *Sukhiye stroitel'nyye smesi* [Dry construction mixtures], no. 1, pp. 35–38. (In Russ.)
5. Vrancken C., Longhurst P. J., Wagland S. T. 2018, Critical review of real-time methods for solid waste characterization: Informing material recovery and fuel production. *Waste Management*, vol. 61, pp. 40–57. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.01.019>
6. Bogdanov V. S., Vorobiev N. D. 1985, Kinematics of ball loading in drum mills with inclined interchamber partitions. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal], no. 16, pp. 84–96. (In Russ.)
7. Petrov V. A., Andreev E. E., Bilenko L. F. Crushing, grinding and screening of useful minerals. Moscow: Nedra, 1990. 301 p. (In Russ.)
8. Sysa A. B. 1994, On the choice of rational directions for the development of grinding equipment. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tsvetnaya metallurgiya* [News of the Higher Institutions. Non-ferrous metallurgy], no. 3, pp. 67–75. (In Russ.)
9. Dmitrak Yu. V., Shishkanov K. A. 2010, Development of a probabilistic kinematic model of grinding bodies in the grinding chamber of a vibration mill. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining informational and analytical bulletin], no. 12, pp. 302–308. (In Russ.)
10. Dmitrak Yu. V. 2000, The theory of grinding loading motion and increasing the efficiency of equipment for fine grinding of rocks: abstract of the dis. ... Dr. Tech. Sciences. Moscow, 44 p. (In Russ.)
11. Dmitrak Yu. V., Verzhansky A. P., Dzyubenko M. V., Novikov A. M. Device for receiving information via telephone lines: patent for invention RU 2013879. Application no. 5062344/09P; dated 16.09.92; 30.05.94. (In Russ.)

✉ v.i.golik@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1181-8452>

*hambi@list.ru

**dzapa64@yandex.ru

***dzboris@gmail.com

12. Gabaraev O. Z., Dmitrak Yu. V., Drebenstedt K., Savelkov V. I. 2017, Regularities of interaction of destroyed geomaterials and ore-bearing massif during mining of underworked disseminated ores. *Ustoychivoye razvitiye gornykh territoriy* [Sustainable Development of Mountain Territories], vol. 9, no. 4 (34), pp. 406–413. (In Russ.)
13. Ben-Awuah E., Richter O., Elkington T., Pourrahimian Y. 2016, Strategic mining options optimization: Open pit mining, underground mining or both. *International Journal of Mining Science and Technology*, vol. 26, issue 6, pp. 1065–1071.
14. Gryazev M. V., Kachurin N. M., Zakharov E. I. 2016, Tula State University: 85 Years in the Service of the Fatherland. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], no. 2, pp. 25–29. (In Russ.)
15. Cardu M., Seccatore J., Vaudagna A., Rezende A., Galvão F., Bettencourt J. S., Tomi de G. 2015, Evidences of the influence of the detonation sequence in rock fragmentation by blasting. Part I. *REM: Revista Escola de Minas*, vol. 68, no 3, pp. 337–342. <https://doi.org/10.1590/0370-44672014680218>

The article was received on March 2, 2021