

Оригинальная статья / Original article

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-4-117-131>

Методика выбора управляющих решений при оптимизации технологических режимов переработки железорудного сырья с использованием электромагнитных воздействий

А.В. Ананьева ¹ ✉

¹ Ассоциация субъектов инновационной деятельности в горной отрасли "Инновационные горные технологии"
Ленинский пр-т, д. 4, стр. 1а, г. Москва 119991, Российская Федерация

✉ e-mail: plotnikovaav@inbox.ru

Резюме

Цель исследования. В работе рассмотрен процесс селективного предразрушения межфазовых границ в железных рудах при использовании магнитно-импульсной обработки.

Методы. При анализе напряженно-деформированного состояния и вязкого разрушения выявлено относительное сходство критериев разрушения в основных минералах железных руд за счет магнитно-стрикционного деформирования зерен магнетита. Установлено, что прочность и вязкость разрушения магнетита превышает аналогичные свойства кальцитов, входящих в состав скарновых железных руд, прочность и вязкость разрушения кварца превышает аналогичные свойства магнетита. Выявлено различие в характере разрушения скарновых руд и железистых кварцитов.

Результаты. Сформулирован критерий оценки степени разупрочнения межфазовых границ в железных рудах за счет магнитно-импульсного воздействия на основе вероятностного подхода. Произведена теоретическая оценка степени селективного разупрочнения железных руд при магнитно-импульсной обработке с учетом прочностных и магнитно-стрикционных свойств магнетита.

Приведены результаты экспериментов наноиндентирования межфазовых границ до и после магнитно-импульсной обработки.

Заключение. Путем анализа длин развивающихся микротрещин под воздействием наноиндентера выявлена возможность снижения вязкости разрушения после магнитно-импульсной обработки железной руды.

Ключевые слова: управление технологическим процессом; недостаток исходной информации; физико-технологические закономерности; обогащение полезных ископаемых; измельчение; железные руды; магнитно-импульсная обработка; критерии селективного разупрочнения.

Конфликт интересов: Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Ананьева А.В. Методика выбора управляющих решений при оптимизации технологических режимов переработки железорудного сырья с использованием электромагнитных воздействий // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023; 27(4): 117-131. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-4-117-131>.

Поступила в редакцию 03.11.2023

Подписана в печать 30.11.2023

Опубликована 21.12.2023

Technique for Selecting Control Decisions in Optimizing Technological Modes of Processing Iron Ore Raw Materials Using Electromagnetic Influences

Anna V. Ananeva¹ ✉

¹ Association of subjects of innovative activity in the mining industry "Innovative mining technologies"
Leninsky ave., 4, building 1A, Moscow 119991, Russian Federation

✉ e-mail: plotnikovaav@inbox.ru

Abstract

Purpose of research. The paper considers the process of selective pre-destruction of interphase boundaries in iron ores by using magnetic-pulse treatment. When analyzing the stress-strain state and viscous fracture, the relative similarity of the fracture criteria in the main minerals of iron ores due to magnetically-striction deformation of magnetite grains.

Methods. It has been established that the strength and toughness of the destruction of magnetite exceeds the analogous properties of calcite in the composition of skarn iron ores, the strength and toughness of quartz fracture exceeds the analogous properties of magnetite. A difference in the character of the destruction of skarn ores and ferruginous quartzites. The criterion for estimating the degree of softening of interphase boundaries in iron ores due to the magnetic-impulse action based on the probabilistic approach is formulated.

Results. A theoretical estimate is made of the degree of selective softening of iron ores under magnetic-pulse treatment, taking into account the strength and magnetostriction properties of magnetite. The results of experiments on nanoindentation of interphase boundaries before and after magnetic-pulse processing are presented.

Conclusion. By analyzing the lengths of developing microcracks under the influence of a nanoindenter, the possibility of reducing the fracture toughness after a magnetic pulse treatment of iron ore

Keywords: technological process control; lack of initial information; physical and technological laws; mineral processing; barrel grinding; iron ores; magnetic pulse processing; criteria of selective softening.

Conflict of interest. The author declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Ananeva A. V. Technique for Selecting Control Decisions in Optimizing Technological Modes of Processing Iron Ore Raw Materials Using Electromagnetic Influences. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2023; 27(4): 117-131 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2023-27-4-117-131>.

Received 03.11.2023

Accepted 30.11.2023

Published 21.12.2023

Введение

Развитие современных технологий переработки железорудного сырья ори-

ентировано на повышение эффективности. Очевидно, что весь технологический процесс подготовки руды к обогащению настроен на то, чтобы добить-

ся максимального извлечения полезных элементов и минимизировать потери полезного компонента [1, 2]. Это одно из ключевых условий для устойчивого развития горного производства и рационального использования природных ресурсов [3, 4]. Для оптимальной добычи полезных элементов необходимо правильно смешать рудные материалы и провести их через все этапы дробления и помола до получения частиц требуемого размера. Затем можно извлечь эти элементы с помощью наиболее подходящей для этого физической или химической технологии [5, 6, 7].

Важной частью обогащения ископаемых является разрушение границы фаз и получение отдельных частиц компонентов для их дальнейшего разделения по физическим и химическим характеристикам [8, 9, 10]. В случае сложных, упорных руд или промежуточных продуктов рациональными могут оказаться немеханические методики энергетического воздействия [11, 12].

С другой стороны, при одинаковой степени измельчения, минералы рудных и нерудных труднообогатимых пород обычно показывают меньшую степень раскрытия, чем средне- и легкообогатимые руды, и это полностью физически и химически объяснимо [13]. Для труднообогатимых железных руд следует отметить более низкое количество свободных рудных зерен и повышенное количество вкрапленников [6, 14].

Влияние минералого-петрографических факторов на обогатимость прояв-

ляется в характере структурных особенностей и корреляционных связей параметров вещественного состава и строения руд с показателями обогащения [15, 16, 17] и является основой для создания новых, более эффективных методов.

Для эффективного управления технологическим процессом в современных условиях создаются «цифровые подсказчики», которые вырабатывают экспертные решения на основе анализа информационных потоков, собираемых системой датчиков (сенсоров), а методы управления становятся комплексными и содержат новые управляемые параметры исходного сырья как напрямую, так и через использование специального оборудования.

Как правило, эти решения являются вероятностными из-за отсутствия (или недостаточности) исходной информации. Для повышения точности подаваемых в систему управления данных предлагается дополнить недостающую информацию использованием физико-технологических зависимостей, связывающих различные факторы и результаты технологического процесса.

В настоящей статье рассматривается анализ потенциальных физико-технологических зависимостей.

Материалы и методы

Объектом исследования является процесс рудоподготовки с использованием предварительной магнитно-импульсной обработки (МИО). Методы

исследования базируются на теоретическом сравнении параметров разрушения, взятых из известных силовых моделей, включая энергетические параметры разрушения из теории Баландина и модели вязкого разрушения по Ирвину. Экспериментальные исследования основываются на анализе процесса трещинообразования методом наноиндетирования.

Исходные предпосылки для построения методики

Очевидно, что в настоящее время больший упор делается на использование уже существующих физических и химических законов обработки (переработки) железорудного сырья, и открыть что-то новое практически невозможно, однако некоторая комбинация уже существующих методов позволяет получить более эффективные решения. Приводимая в настоящем разделе информация необходима для составления общей методики.

Разупрочняющий эффект магнитопульсовой обработки (МИО) обусловлен рядом физических процессов, включая магнитострикцию магнетитовых зерен, обратный пьезоэлектрический эффект в нерудной фазе (в случае железистых кварцитов), движение заряженных дислокаций и др. [18, 19, 20].

МИО проводится как промежуточный этап подготовки руды к механическому измельчению. Трещинообразование под воздействием механических нагрузок на этапах дробления и измельчения во многом зависит от упругопла-

стических свойств руды. Селективность разрушения определяется степенью снижения прочности границ срастания минеральной и неминеральной фаз. Таким образом, большое значение имеют контактные напряжения, возникающие в результате МИО на границах между рудной и нерудной фазами.

Критерий разрушения по теории Баландина [21] имеет вид:

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_1\sigma_3 - (\sigma_{сж} - \sigma_p)(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_p\sigma_{сж}, \quad (1)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения;

$\sigma_p, \sigma_{сж}$ – пределы прочности на растяжение и сжатие.

При магнитострикционном объемном изменении формы магнетитовых зерен на границе раздела фаз создаются сжимающие радиальные контактные напряжения $\sigma_{конт.}$ и тангенциальные растягивающие напряжения, величина которых вдвое меньше контактных напряжений.

Тогда критерий разрушения по теории Баландина [21] примет вид:

$$\sigma_{конт} > \frac{2}{3} \sqrt{\sigma_{сж}\sigma_p}, \quad (2)$$

где $\sigma_{конт}$ – величина контактных напряжений на границе между рудной и нерудной фазами, вызванная магнитострикционным изменением формы зерен.

Если условие (2) выполнено, то происходит полное разрушение на границе фаз. Если условие не выполняется, возможно частичное снижение прочности границ. На рис. 1 представлены значения критических контактных напряжений для основных минералов в железных рудах.

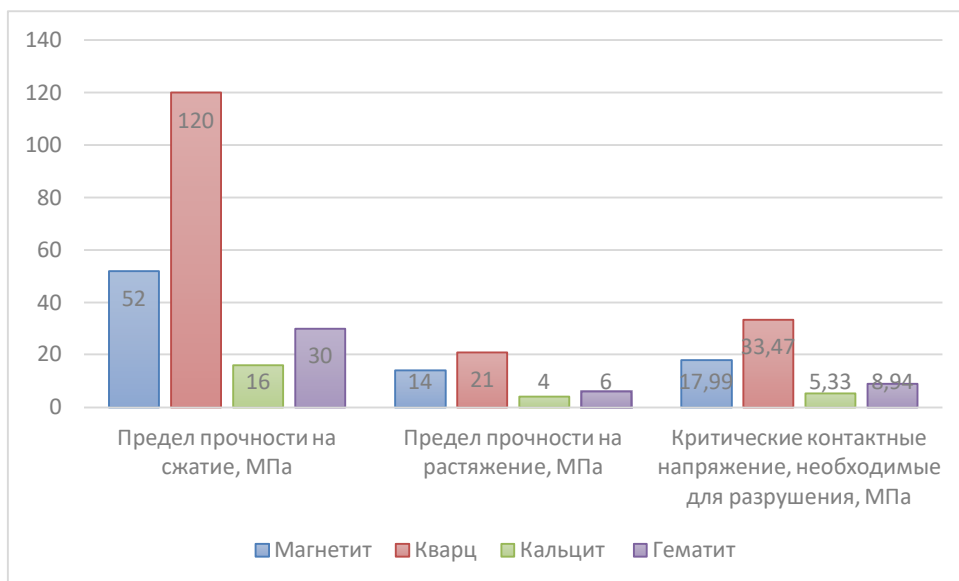


Рис. 1. Критические контактные напряжения для различных минералов

Fig. 1. The critical contact stress for various minerals

Следует отметить, что прочностные свойства горных пород и минералов определяют условия разрушения массива, однако они не полностью характеризуют такие технологические характеристики, как, к примеру, измельчаемость. Это объясняется тем, что под воздействием на массив критическими нагрузками формируется макротрещина, длина которой значительно превышает характерный размер минерального зерна [22]. В процессах дробления и измельчения происходят множественные акты разрушения. Таким образом, процесс дезинтеграции определяется энергетическими затратами на новообразованную поверхность. Так, например, используются: критерий Риттингера, характеризующий величину энергетических затрат на разрушение прямо пропорциональную вновь образованной поверхности [23, 24]: энергетические затраты на новообразованную поверхность

определяются параметром γ (Дж/м²) – энергия единицы вновь образованной поверхности. Значение γ связано с вязкостью разрушения (параметр Ирвина) и механическими характеристиками следующим образом:

$$\gamma = \frac{(1-\nu^2) \cdot K^2}{2 \cdot E}, \quad (3)$$

где E – модуль упругости минерала;

K – коэффициент вязкости разрушения Ирвина, Н/м^{3/2};

ν – коэффициент Пуассона.

На основании исследований, представленных в работе [26], на рис. 2 показаны рассчитанные значения удельной энергии новообразованной поверхности γ для отдельных минералов.

Проведем сравнение параметров разрушения для разных минералов по теориям Баландина и Ирвина. При этом свойства магнетита принимаются в качестве стандартного эталона. Результаты сравнения приведены на рис. 3.

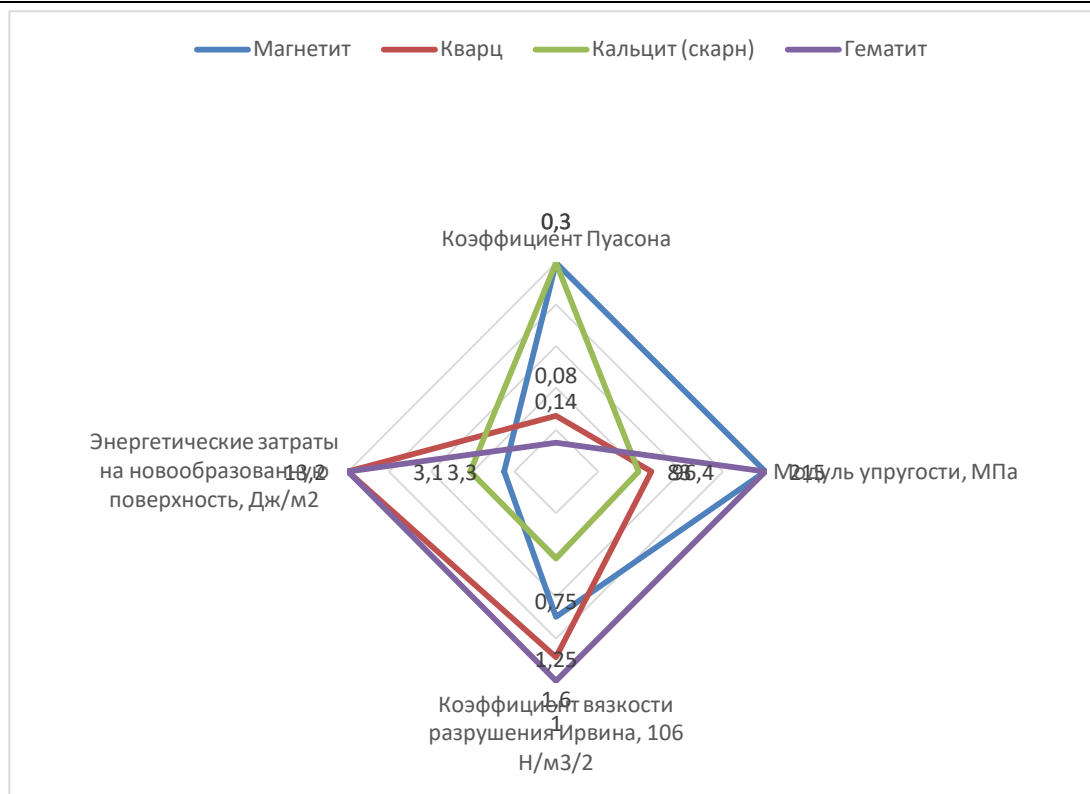


Рис. 2. Удельная энергия вновь образованной поверхности для различных минералов

Fig. 2. Specific energy of the newly formed surfaces for various minerals

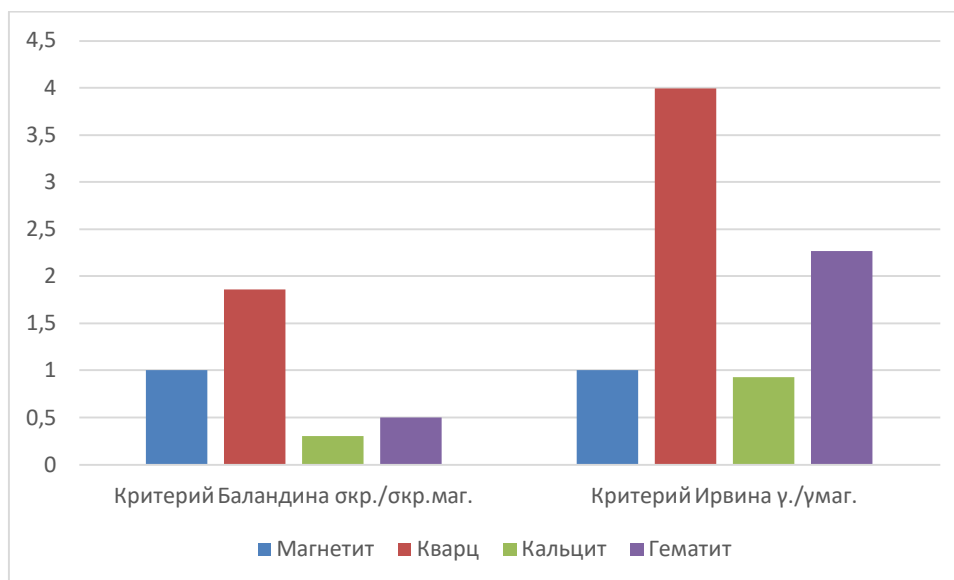


Рис. 3. Сопоставление механических свойств минералов относительно магнетита по критериям Баландина ($\sigma_{кр.}/\sigma_{кр.маг.}$) и Ирвина ($\gamma./\gamma_{маг.}$)

Fig. 3. Comparison of the mechanical properties of minerals with respect to magnetite according to the criteria of Balandin and Irvine

По данным, представленным на рис. 3, можно сделать вывод, что различия в прочностных свойствах основных минералов по параметрам Баландина и Ирвина относительно свойств магнетита носят одинаковый характер. Как было продемонстрировано в работах [26, 27], предельное значение магнитострикционного изменения формы магнетита равно $\lambda = 0,6 \times 10^{-4}$ и недостаточно для создания критических контактных напряжений. Таким образом, магнито-импульсная обработка может обеспечивать только избирательное предразрушение границ срастания минеральной и неминеральной фаз.

Предварительное разрушение может начаться при появлении пластических деформаций в самых слабых местах зон сращения минералов в горной породе. Обычно это происходит при нагрузках, равных 0.4 - 0.66 от критического напряжения [28, 29, 25].

Тогда принимаем, что степень разупрочнения определяется отношением:

$$W = \frac{\sigma_{\text{конт.}} - k\sigma_{\text{кр.}}}{\sigma_{\text{бал}} - k\sigma_{\text{кр.}}}, \quad (4)$$

принимаем, что k лежит в диапазоне 0,4 – 0,66 от $\sigma_{\text{кр.}}$, что позволит оценить степень межзернового разупрочнения [26]. Расчетные значения степени снижения прочности находятся в интервале от 0 до 20%.

Методика выбора управляющих решений

Представленные выше предпосылки позволяют сформулировать методи-

ку выбора управляющих решений при оптимизации технологических режимов переработки железорудного сырья с использованием электромагнитных воздействий:

1. Определение гранулометрических, физико-химических параметров исходного сырья.

2. Оценка сырья по критерию разрушения – следует выбирать минимальное значение напряжения, при котором происходит полное разрушение на границе фаз (см. формула (2)). Оптимальность в этом случае определяет необходимую напряженность для оказания воздействия на сырье. Очевидно, что недостаточная напряженность не будет проводить разрушение на границе фаз, а избыточное напряжение будет затрачивать лишнюю энергию.

3. Оценка сырья по критерию Риттингера (формула (3)), которая охарактеризует величину энергетических затрат на разрушение – по сути оно прямо пропорционально вновь образованной поверхности – таким образом получаем второй критерий оптимальности по величине поверхностного напряжения. Аналогично предыдущему критерию выбор параметров электромагнитных воздействий характеризуется достаточным полем, которое необходимо создать для получения эффекта, и превышение которого будет характеризоваться избыточным энергопотреблением.

4. Комплексование критериев. Создаваемые при этом условия должны удовлетворять ограничениям, накладываемым на процесс.

ваемым на промышленные установки и условиям работы.

В работе [30] показаны результаты исследований влияния магнитно-импульсной обработки железистых кварцитов на коэффициент вязкости разрушения на границе срастания магнетита и кварца. Оценка величины коэффициента вязкости разрушения (K_c) проводилась путем

внедрения наноиндентора в зону срастания магнетита и кварца [31].

Предлагаемая методика была апробирована на ряде экспериментов, которые дали результаты, представленные на рис. 4 и 5. Можно сделать выводы, что магнитно-импульсная обработка снижает коэффициент вязкости разрушения от 2% до 19%.

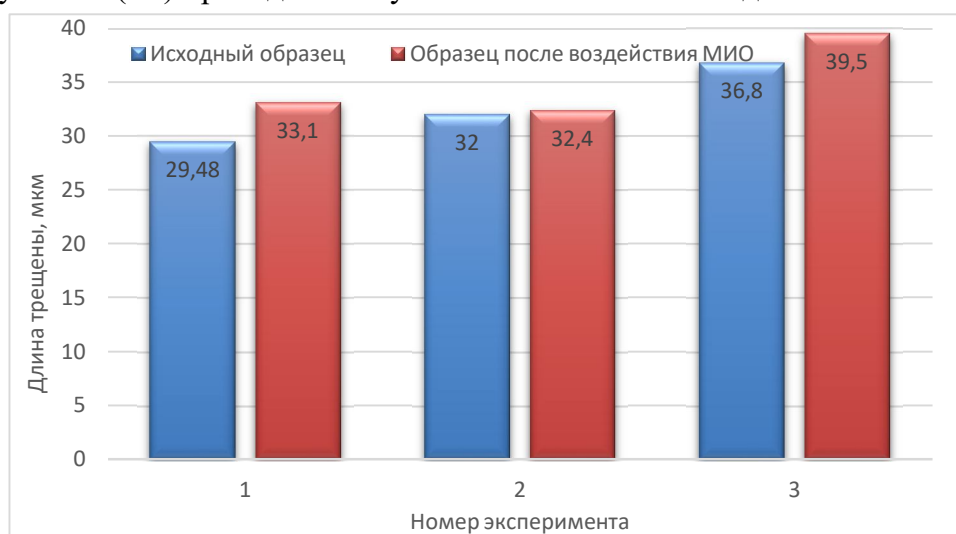


Рис. 4. Линейный размер микротрещин в образце при наноиндентировании до и после воздействия МИО

Fig. 4. Linear size of microcracks in the sample during nanoindentation before and after exposure to MIO

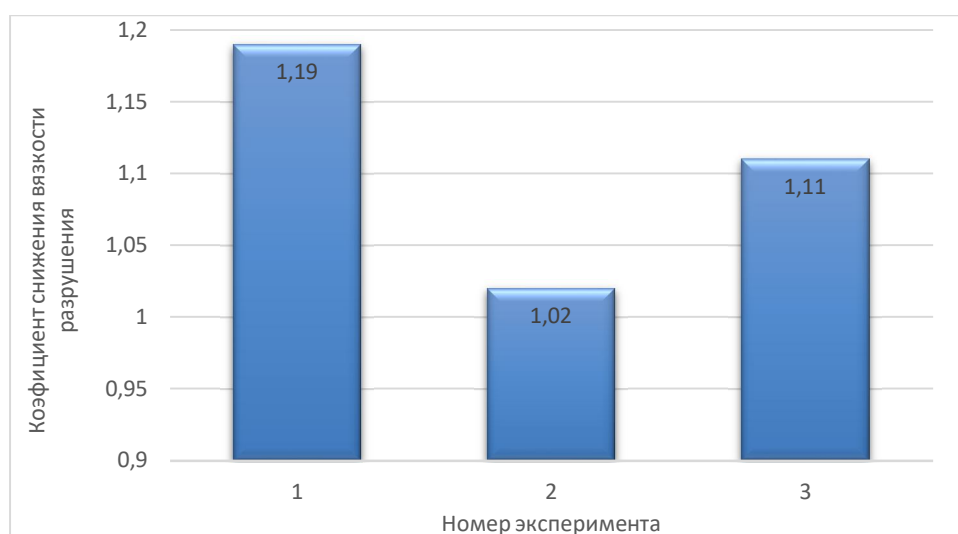


Рис. 5. Коэффициент снижения вязкости разрушения образца после воздействия МИО

Fig. 5. The coefficient of reduction of the fracture viscosity of the sample after exposure to MIO

Встраивание оборудования магнитно-импульсной обработки в состав измельчительного комплекса должно повлиять на процесс измельчения, так как в рудном материале снижаются механические свойства. Оборудование магнитно-импульсной обработки является подсистемой измельчительного комплекса, что потребует расширения объема информационных потоков таким образом, чтобы прирост объема измельчаемой руды был связан со степенью ее разупрочнения.

В ранее проведенных исследованиях [32] рассматривался подход к описанию процесса самоизмельчения железистых кварцитов на примере Лебединского ГОКа. Модель мельницы мокрого самоизмельчения по каналу расход руды Q и мощность мельницы P описывалась уравнением:

$$W_{MMC(p)} = \frac{5}{19,5p+1} \times \frac{1}{2,4p+1}. \quad (5)$$

В модели (5) коэффициент усиления по каналу $Q - P$ равен

$$\frac{P}{Q} = k = 5. \quad (6)$$

Таким образом, применение МИО можно рассматривать как возмущающее воздействие на процесс работы измельчительного комплекса.

Выводы

1. Отличия в прочности основных минералов согласно моделям Баландина и Ирвина в отношении свойств магнетита одинаковы, следовательно, для изучения селективного разрушения применимо силовое моделирование Баландина.

2. Экспериментально установлено, что при МИО происходит снижение коэффициента вязкости разрушения в диапазоне от 2% до 19%, что соответствует расчетной оценке по формуле (4), при следующих свойствах магнетита: магнитострикционная деформация $\lambda = 0,6 \times 10^{-4}$, предел прочности на сжатие $\sigma_{сж} = 52$ МПа, предел прочности на растяжение $\sigma_p = 14$ МПа.

3. Сформулированная методика позволяет повысить эффективность технологических режимов переработки железорудного сырья с использованием электромагнитных воздействий.

Список литературы

1. Mine operating costs and the potential impacts of energy and grinding / James A. Curry, Mansel J. L. Ismay, Graeme J. Jameson // Minerals Engineering. 2014. 56: 70-80. DOI: 10.1016/j.mineng.2013.10.020.
2. Improving the control system of concentration plants based on express control of dissemination of magnetic minerals / A. Chumakov, V. Prischepov, K. Melekhina, A. Ivannikov // 2021, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 684 012005. DOI: 10.1088/1755-1315/684/1/012005.

3. Litvinenko V. S., Tsvetkov P. S., Molodtsov K. V. The social and market mechanism of sustainable development of public companies in the mineral resource sector // *Eurasian Mining*. 2020(1). Pp. 36–41. DOI: 10.17580/em.2020.01.07.
4. Обеспечение экологической безопасности при внедрении ресурсовозобновляемых технологий / М. М. Хайрутдинов, П. А. Каунг, З. Я. Чжо, Ю. С. Тюляева // *Безопасность труда в промышленности*. 2022. № 5. С. 57-62. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-5-57-62.
5. Современные тенденции технического прогресса в переработке железных руд / Т. И. Юшина, Е. Л. Чантурия, А. М. Думов, А. В. Мясков // *Горный журнал*. 2021. № 11. С. 75–83. DOI: 10.17580/gzh.2021.11.10.
6. Clout J. M. F., Manuel J. R. Mineralogical, chemical, and physical metallurgical characteristics of iron ore. *Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability*, 2021, p. 59–108. DOI: 10.1016/B978-0-12-820226-5.00012-4.
7. Express determination of the grain size of nickel-containing minerals in ore material / A. Ivannikov, A. Chumakov, V. Prischepov, K. Melekhina // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 38. Part 4. Pp. 2059-2062. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.141.
8. Gutsche O., Fuerstenau D. W. Influence of Particle Size and Shape on the Comminution of Single Particles in a Rigidly Mounted Roll Mill // *Powder Technology*. 2004. 143–144. 186–195. DOI: 10.1016/j.powtec.2004.04.013.
9. Comminution modeling using mineralogical properties of iron ores / A. Mwanga, M. Parian, P. Lamberg, J. Rosenkranz // *Minerals Engineering*. 2017, 111, 182-197. DOI: 10.1016/j.mineng.2017.06.017.
10. Моделирование и оптимизация процесса рудоподготовки комплексных руд при их дезинтеграции в мельнице самоизмельчения / К. А. Мелехина, П. П. Ананьев, А. В. Плотникова, А. С. Тимофеев, С. А. Шестак // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020. № 10. С. 95–105. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-95-105.
11. Usov A., Tsukerman V. Prospective of electric impulse processes for the study of the structure and processing of mineral raw materials // *Developments in Mineral Processing*. 2000. 13: 8-15. DOI: 10.1016/S0167-4528(00)80008-3.
12. Бабич А. В., Винников В. А. Экспериментальные исследования структурных изменений минеральных зерен пиритосодержащих руд в СВЧ полях // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019. № 6. С. 106–114. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-106-114.
13. On the issue of typical grain size assessment by the methods of broadband laser optoacoustics / A. Kravcov, A. Konvalinka, V. A. Vinnikov, E. A. Ertuganjva, I. A. Shibaev, P. N. Ivanov // *Key Engineering Materials*. 2017. 755. Pp. 212–218. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.755.212.

14. Kuskov V. B., Lvov V. V., Yushina T. I. Increasing the recovery ratio of iron ores in the course of preparation and processing // *CIS Iron and Steel Review*. 2021. Vol. 21. № 1. Pp. 4—8. DOI: 10.17580/cisirs.2021.01.01.
15. Jankovic A. Comminution and classification technologies of iron ore. *Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability*. 2021. Pp. 269 – 308. DOI: 10.1016/B978-0-12-820226-5.00013-6.
16. Selective disintegration justification based on the mineralogical and technological features of the polymetallic ores / Т., Aleksandrova N. Nikolaeva, A. Afanasova, A. Romashev, V. Kuznetsov // *Minerals*. 2021. 11(8), 851. DOI: 10.3390/min11080851.
17. Пелевин А. Е. Использование результатов фазового состава магнетитовой руды для прогнозирования выхода концентрата // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2022. № 5—1. С. 131—144. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_51_0_131.
18. Головин Ю. И., Моргунов Р. Б., Иванов В. Е. Термодинамические и кинетические аспекты разупрочнения ионных кристаллов импульсным магнитным полем // *Физика твердого тела*. 1997, 39 (11): 2016-2018.
19. Ананьев П. П., Гридин О. М., Самерханова А. С. Взаимосвязь свойств и электромеханическая чувствительность природных минералов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2008, 5: 184-189.
20. Плотникова А. В. Ресурсосберегающая технология переработки труднообогатимых руд на основе магнитно-импульсного воздействия // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2013, 9: 69-70. DOI: 10.17073/0368-0797-2013-9-69-70.
21. Каркашадзе Г. Г. Механическое разрушение горных пород. М.: МГГУ, 2004. 222.
22. Winiarski B., Guz I. A. The effect of cracks interaction for transversely isotropic layered material under compressive loading // *Finite Elements in Analysis and Design*. 2008. 44 (4): 197-213. DOI:10.1016/j.finel.2007.11.021.
23. Биленко Л. Ф. Закономерности измельчения в барабанных мельницах. М.: Недра, 1984. 200 с.
24. Lojkowski W., Fecht H. J. The structure of intercrystalline interfaces // *Progress in Materials Science*. 2000. 45 (5–6): 339-568. DOI: 10.1016/s0079-6425(99)00008-0.
25. Arutyunyan A. R., Arutyunyan R. A. Application of the Fracture Mechanics and Reliability Methods to the Fatigue Problem // *Procedia Materials Science*. 2014. 3: 1291-1297. DOI: 10.1016/j.mspro.2014.06.209.
26. Гончаров С. А., Ананьев П. П., Иванов В. Ю. Разупрочнение горных пород под действием импульсных электромагнитных полей. М.: МГГУ, 2006. 91 с.
27. Гридин О. М., Гончаров С. А. Электромагнитные процессы. М.: МГГУ, 2009. 498 с.
28. Шатемиров Д. К., Тилегенов К. Т. Особенности акустической эмиссии при релаксации горных пород // *Вестник КРСУ*. 2006. 6 (7): 51-55.

29. Лавров А. В., Шкурятник В. Л., Филимонов Ю. Л. Акусто-эмиссионный эффект памяти в горных породах. М., 2004. 456 р.
30. Разупрочнение межфазных границ железистых кварцитов под влиянием магнитно-импульсной обработки / А. И. Тюрин, А. М. Купряшкин, П. П. Ананьев, С. В. Ермаков, А. В. Плотникова // Вестник Тамбовского университета. Естественные и технические науки. 2013. 18 (4). С. 1699-1700.
31. Исследование прочностных свойств отдельных фаз и межфазных границ сложных многофазных материалов на примере горных пород / А. И. Тюрин, С. Д. Викторов, А. Н. Кочанов, А. В. Шуклинов, Т. С. Пирожкова, И. А. Шуварин, А. А. Самодуров // Вестник Тамбовского университета. Естественные и технические науки. 2016. 21 (3): 1368-1374. DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-3-1368-1374.
32. Осипова Н.В., Ананьев П.П. Исследование модели функционирования измельчительного комплекса с применением импульсной электромагнитной обработки руды // Научный вестник Московского государственного горного университета. 2012, 8: 98-102.

References

1. James A. Curry, Mansel J. L. Ismay, Graeme J. Jameson, Mine operating costs and the potential impacts of energy and grinding. *Minerals Engineering*. 2014. 56: 70-80. DOI: 10.1016/j.mineng.2013.10.020.
2. Chumakov A., Prischepov V., Melekhina K., Ivannikov A.. Improving the control system of concentration plants based on express control of dissemination of magnetic minerals. 2021, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 684 012005. doi:10.1088/1755-1315/684/1/012005.
3. Litvinenko V. S., Tsvetkov P. S., Molodtsov K. V. The social and market mechanism of sustainable development of public companies in the mineral resource sector. *Eurasian Mining*, 2020(1), pp. 36–41. DOI: 10.17580/em.2020.01.07.
4. Khayrutdinov M. M., Kaung P. A., Chzho Z. Ya., Tyulyaeva Y. S. Obespechenie ekologicheskoi bezopasnosti pri vnedrenii resursovozobnovlyaemykh tekhnologii [Ensuring Environmental Safety in the Implementation of the Resource-renewable Technologies]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*, 2022(5), pp. 57–62. DOI: 10.24000/0409-2961-2022-5-57-62.
5. Yushina T. I., Chanturia E. L., Dumov A. M., Myaskov A. V. Sovremennye tendentsii tekhnicheskogo progressa v pererabotke zheleznykh rud [Modern trends of technological advancement in iron ore processing]. *Gornyi Zhurnal*, 2021, (11), pp. 75–83. DOI: 10.17580/gzh.2021.11.10.

6. Clout J. M. F., Manuel J. R. Mineralogical, chemical, and physical metallurgical characteristics of iron ore. *Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability*, 2021, pp. 59–108. DOI: 10.1016/B978-0-12-820226-5.00012-4
7. Ivannikov A., Chumakov A., Prischepov V., Melekhina K. Express determination of the grain size of nickel-containing minerals in ore material. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 38, part 4, pp. 2059–2062. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.141.
8. Gutsche O., Fuerstenau D. W. Influence of Particle Size and Shape on the Comminution of Single Particles in a Rigidly Mounted Roll Mill. *Powder Technology*, 2004, 143–144, 186–195. DOI: 10.1016/j.powtec.2004.04.013.
9. Mwanga A., Parian M., Lamberg P., Rosenkranz J. Comminution modeling using mineralogical properties of iron ores. *Minerals Engineering*, 2017, 111, pp. 182–197. DOI: 10.1016/j.mineng.2017.06.017.
10. Melekhina K. A., Ananyev P. P., Plotnikova A. V., Timofeev A. S., Shestak S. A. Modelirovanie i optimizatsiya protsessa rudopodgotovki kompleksnykh rud pri ikh dezintegratsii v mel'nitse samoizmel'cheniya [Modeling and optimization of complex ore pretreatment by disintegration in autogenous mills]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' = Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2020(10), pp. 95–105. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-10-0-95-105.
11. Usov A., Tsukerman V. Prospective of electric impulse processes for the study of the structure and processing of mineral raw materials. *Developments in Mineral Processing*. 2000. 13: 8–15. DOI: 10.1016/S0167-4528(00)80008-3.
12. Babich A. V., Vinnikov V. A. Eksperimental'nye issledovaniya strukturnykh izmenenii mineral'nykh zeren piritosoderzhashchikh rud v SVCh polyakh [Experimental investigations of structural changes of pyrite-containing ores mineral grains in the microwave fields]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' = Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2019, 2019(6), pp. 106–114. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-106-114.
13. Kravcov A., Konvalinka A., Vinnikov V. A., Ertuganjva E. A., Shibaev I. A., Ivanov P. N. On the issue of typical grain size assessment by the methods of broadband laser optoacoustics. *Key Engineering Materials*, 2017, 755, pp. 212–218. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.755.212.
14. Kuskov V. B., Lvov V. V., Yushina T. I. Increasing the recovery ratio of iron ores in the course of preparation and processing. *CIS Iron and Steel Review*. 2021, vol. 21, no 1, pp. 4–8. DOI: 10.17580/cisir.2021.01.01.
15. Jankovic A. Comminution and classification technologies of iron ore. *Iron Ore: Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability*, 2021, 269 – 308. DOI: 10.1016/B978-0-12-820226-5.00013-6.

16. Aleksandrova T., Nikolaeva N., Afanasova A., Romashev A., Kuznetsov V. Selective disintegration justification based on the mineralogical and technological features of the polymetallic ores. *Minerals*, 2021, 11(8), 851. DOI: 10.3390/min11080851.
17. Pelevin A. E. Ispol'zovanie rezul'tatov fazovogo sostava magnetitovoi rudy dlya prognozirovaniya vykhoda kontsentrata [Using the results of the phase composition of magnetite ore to predict the yield of concentrate]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' = Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2022(5-1), pp. 131–144. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_51_0_131.
18. Golovin Yu. I., Morgunov R. B., Ivanov V. E. Termodinamicheskie i kineticheskie aspekty razuprochneniya ionnykh kristallov impul'snym magnitnym polem [Thermodynamic and kinetic aspects of the softening of ionic crystals by a pulsed magnetic field]. *Fizika tverdogo tela = Solid State Physics*. 1997, 39 (11): 2016-2018.
19. Ananiev P. P., Gridin O. M., Samerchanova A. S. Vzaimosvyaz' svoystv i elektromekhanicheskaya chuvstvitel'nost' prirodnykh mineralov [Interrelation of properties and electromechanical sensitivity of natural minerals]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' = Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2008, 5: 184-189.
20. Plotnikova A. V. Resursosberegayushchaya tekhnologiya pererabotki trudnoobogatimyykh rud na osnove magnitno-impul'snogo vozdeystviya [Resource-saving technology for processing refractory ores based on the magnetic-impulse action]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya = Bulletin of Higher Educational Institutions. Ferrous metallurgy*. 2013. 9: 69-70. DOI: 10.17073/0368-0797-2013-9-69-70.
21. Karkachadze G. G. *Mekhanicheskoe razrushenie gornyykh porod* [Mechanical destruction of rocks]. Moscow, MSMU Publ., 2004, 222 p.
22. Winiarski B., Guz I. A. The effect of cracks interaction for transversely isotropic layered material under compressive loading. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2008, 44 (4): 197-213. DOI: 10.1016/j.finel.2007.11.021.
23. Bilenko L. F. *Zakonomernosti izmel'cheniya v barabannykh mel'nitsakh* [Regularities barrel grinding]. Moscow, Nedra Publ., 1984, 200 p.
24. Lojkowski W., Fecht H. J. The structure of intercrystalline interfaces. *Progress in Materials Science*. 2000. 45 (5–6): 339-568. DOI: 10.1016/s0079-6425(99)00008-0.
25. Arutyunyan A. R., Arutyunyan R. A. Application of the Fracture Mechanics and Reliability Methods to the Fatigue Problem. *Procedia Materials Science*. 2014, 3: 1291-1297. DOI: 10.1016/j.mspro.2014.06.209.
26. Goncharov S. A., Ananiev P. P., Ivanov V. Yu. *Razuprochnenie gornyykh porod pod deystviem impul'snykh elektromagnitnykh polei* [Softening of rocks under the action of pulsed electromagnetic fields]. Moscow, MSMU Publ., 2006, 91 p.
27. Gridin O. M., Goncharov S. A. *Elektromagnitnye protsessy* [Electromagnetic processes]. Moscow, MSMU Publ., 2009. 498 p.

28. Shatemiroy D. K., Tilegenov K. T. Osobennosti akusticheskoi emissii pri relaksatsii gornykh porod [Features of acoustic emission in the relaxation of rocks]. *Vestnik KRSU = Bulletin KRSU*. 2006. 6 (7): 51-55.
29. Lavrov A. V., Shkuratnik V. L., Filimonov Yu. L. *Akusto-emissionnyi effekt pamyati v gornykh porodakh* [Acousto-emission memory effect in rocks]. Moscow, 2004. 456 p.
30. Turin A. I., Kupryashkin A. M., Ananiev P. P., Ermakov S. V., Plotnikova A. V. Razuprochnenie mezhfaznykh granits zhelezistyykh kvartsitov pod vliyaniem magnitno-impul'snoi obrabotki [Softening of interfaces ferruginous quartzite under the influence of magnetic-pulse processing]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Estestvennye i tekhnicheskie nauki = Bulletin of Tambov University. Natural and Technical Sciences*. 2013, 18 (4): 1699-1700.
31. Tyurin A. I., Viktorov S. D., Kochanov A. N., Shuklinov A. V., Pirozhkova T. S., Shuvarin I. A., Samodurov A. A. Issledovanie prochnostnykh svoystv otdel'nykh faz i mezhfaznykh granits slozhnykh mnogofaznykh materialov na primere gornykh porod [Investigation of the strength properties of individual phases and interphase boundaries of complex multiphase materials on the example of rocks]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Estestvennye i tekhnicheskie nauki = Bulletin of Tambov University. Natural and Technical Sciences*. 2016, 21 (3): 1368-1374. DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-3-1368-1374.
32. Osipova N.V., Ananyev P.P. Issledovanie modeli funktsionirovaniya izmel'chitel'nogo kompleksa s primeneniem impul'snoi elektromagnitnoi obrabotki rudy [Study of the functioning model of the grinding complex using pulsed electromagnetic processing of ore]. *Nauchnyi vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta = Scientific Bulletin of Moscow State Mining University*. 2012, 8: 98-102.

Информация об авторе / Information about the Author

Ананьева Анна Валериевна, заместитель генерального директора, Ассоциация субъектов инновационной деятельности в горной отрасли "Инновационные горные технологии", г. Москва, Российская Федерация, e-mail: plotnikovaav@inbox.ru

Anna V. Ananyeva, Deputy General Director, Association of subjects of innovative activity in the mining industry "Innovative mining technologies", Moscow, Russian Federation, e-mail: plotnikovaav@inbox.ru