

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ РУДОПОДГОТОВКИ ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Струк Г.В.

*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург*

Ключевые слова: рудоподготовка, процесс измельчения, энергетическая эффективность, управление, косвенные методы измерения, моделирование.

Аннотация. В данном исследовании приведены результаты изучения мирового и отечественного опыта в области оптимизации процессов рудоподготовки полиметаллического минерального сырья. Методы исследования, использованные при обработке информации включали дедукцию, анализ и синтез. В результате исследования установлено, что наиболее распространенным подходом оптимизации процессов рудоподготовки является модернизация технологической схемы с использованием современных энергоэффективных технологий. Выявлено, что из-за высокой сложности и дороговизны данных процессов, наибольший потенциал оптимизации заключается во внедрении цифровых технологий.

APPLICATION OF DIGITAL SOLUTIONS FOR OPTIMIZATION OF COMMINUTION OF MINERAL RESOURCES

Struk G.V.

Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg

Keywords: comminution, grinding process, energy efficiency, control, indirect measurement methods, modeling.

Abstract. This study presents the results of the study of world and domestic experience in the field of optimization of comminution of polymetallic mineral raw materials. Research methods used in the processing of information included deduction, analysis and synthesis. As a result of the study it was found that the most common approach to optimize comminution is the modernization of the technological scheme with the use of modern energy-efficient technologies. It is revealed that due to the high complexity and costliness of these processes, the greatest potential for optimization lies in the introduction of digital technologies.

Проблема снижения качества сырья, обусловленная уменьшением содержания ценных компонентов, тонким взаимным проращением ценных и породообразующих минералов, близкими физико-механическими свойствами рудных минералов и пустой породы, а также ухудшением характера вкрапленности, в комплексе с увеличением объемов производства приводит операторов горных предприятий к необходимости сокращения капитальных и эксплуатационных затрат на всех этапах переработки минерального сырья [1]. Особенно, это актуально для комплекса рудоподготовки, на долю которого, по разным оценкам, приходится от 50-70% всей электроэнергии горно-перерабатывающего предприятия. При этом, согласно данным отчета Министерства энергетики США, наибольший потенциал энергосбережения во всех энергоемких операциях, связанных с добычей руды, заключается в оптимизации процессов измельчения [2]. В связи с этим, целью данного

исследования являлось изучение существующих методов и основных тенденций в области оптимизации процесса измельчения полиметаллического минерального сырья. Исходя из поставленной цели были сформулированы следующие задачи: выявление современных методов интенсификации процесса измельчения полиметаллических руд и систематизация полученной информации.

В рамках исследования были проанализированы отечественные и зарубежные научные публикации баз научно-технической литературы Scopus, Web of Science, ВАК и РИНЦ, вышедшие в период 2000-2025 гг. и ранжированные по следующим ключевым словам и темам: «оптимизация измельчения», «автоматизация шаровых мельниц», «моделирование измельчения» и «рудоподготовка полиметаллических руд».

Анализ научно-технической литературы показал, что одним из наиболее распространенных подходов, способствующих достижению комплексной переработки минерального сырья, сокращению эксплуатационных затрат и повышению эффективности процесса разрушения, является рациональный выбор технологии рудоподготовки. Так, в настоящее время, на обогатительных фабриках, перерабатывающих полиметаллические руды, все большее распространение приобретают схемы с использованием мельниц полусамои измельчения (далее – ПСИ) [3], замещающих классическую компоновку – последовательное измельчение в стержневых и шаровых мельницах в следствие сокращения капитальных и эксплуатационных затрат (рис. 1).

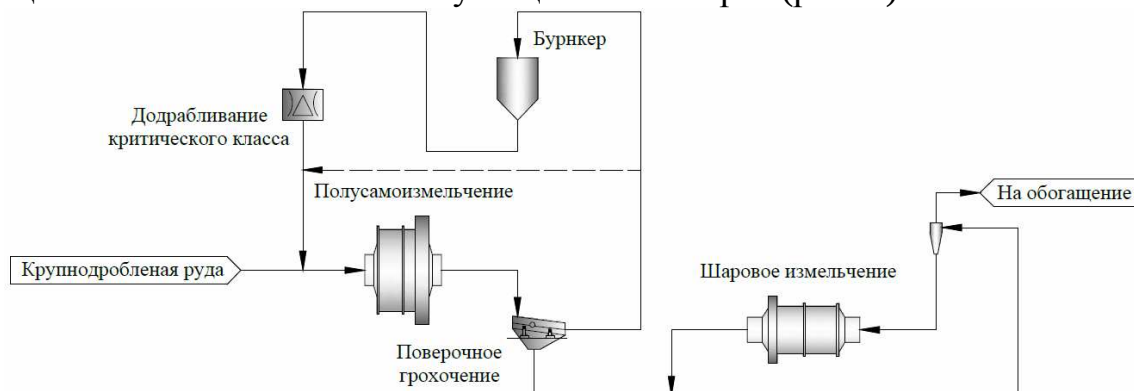


Рис. 1. Стандартная схема рудоподготовки, спроектированная по технологии ПСИ

Конкурирующим вариантом технологии полусамои измельчения является применение измельчающих валков высокого давления (далее – ИВВД) [4] в качестве основных агрегатов для сокращения крупности частиц (рис. 2), преимущество которых заключается в более высокой энергоэффективности и меньшем расходе стали по сравнению со схемами на основе барабанных мельниц.

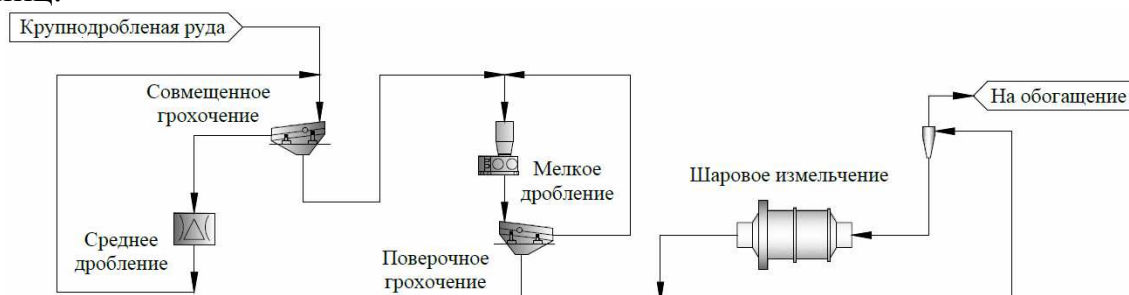


Рис. 2. Стандартная схема рудоподготовки, спроектированная по технологии ИВВД

Также, все большее распространение на предприятиях горно-металлургической отрасли приобретает интеграция в технологические схемы новых конструкций энергоэффективных мельниц: вертикальных (например, Vertimill) [3], и горизонтальных (IsaMill) [5], использующих для интенсификации процесса измельчения силу гравитации и несколько вращающихся дисков, соответственно. Однако, модернизация технологической схемы является наиболее сложным и дорогостоящим мероприятием.

Перспективным подходом к оптимизации процессов рудоподготовки полиметаллического минерального сырья и в частности измельчения, как наиболее энергозатратного этапа, является внедрение цифровых решений – автоматизированных методов контроля технологическим процессом, основанных на технологических достижениях по непрерывному и точному измерению входных и выходных параметров процессов на нескольких участках технологической цепочки, управлению данными в режиме реального времени и анализу этих данных с использованием машинного обучения [2] и искусственного интеллекта [6]. Данный подход, в большинстве случаев требует измерения параметров процесса, в связи с чем усилия ученых по всему сосредоточены на разработке новых и повышении точности существующих косвенных методов измерения. Возможные источники информативных данных о работе барабанных мельниц, а также целевые параметры управления представлены на рисунках 3-4.



Рис. 3. Источники информативных данных о работе барабанных мельниц



Рис. 4. Параметры управления барабанных мельниц

Анализ тенденций в области автоматизированного контроля процессов измельчения показал, что большинство исследований за последние несколько лет в области измерения параметров работы мельниц основаны на совокупной/исключительной регистрации акустического излучения и вибрационных сигналов на корпусе барабанных мельниц.

Акустические датчики используются для оценки общего заполнения мельницы и положений «плечо-носок» измельчающей загрузки и руды, твердости сырья, а также плотности с использованием широкополосных микрофонов [7]. В свою очередь датчики вибрации применяются для контроля изменчивости исходной руды и переменных параметров процесса [8]: крупности продуктов

измельчения, скорости вращения мельницы, загрузки шаров, вязкости пульпы, объемного заполнения рудой и производительности агрегатов. Меньшее распространение для оптимизации процесса измельчения получила реализация теории технического зрения для оценки питания и разгрузки мельниц [9]. При этом большинство данных систем направлены на измерение количественных показателей процесса и только единичные публикации из проанализированных работ за последние пять лет описывают системы, способные распознавать качественные и количественные характеристики перерабатываемого материала [2].

Таким образом, анализ существующих исследований в области интенсификации процессов рудоподготовки полиметаллического минерального сырья показал, что на сегодняшний день выделяют два основных аспекта повышения эффективности подготовительного этапа переработки: технологический и цифровой. При этом последний из рассмотренных способов является наиболее рациональным, так как не отличается высокой трудоемкостью и не требует высоких финансовых затрат.

Научный руководитель: *Николаева Надежда Валерьевна* – к.т.н., доцент, доцент кафедры обогащения полезных ископаемых Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II.

Список литературы

1. Николаева Н.В., Каллаев И.Т. Особенности процесса измельчения медно-молибденовых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 1. – С. 52-66. – doi.org/10.25018/0236_1493_2024_1_0_52.
2. Góralczyk M., Krot P., Zimroz R., Ogonowski S. Increasing Energy Efficiency and Productivity of the Comminution Process in Tumbling Mills by Indirect Measurements of Internal Dynamics—An Overview // *Energies*. 2020, vol. 13, no. 24, p. 6735.
3. Aleksandrova T.N., Orlova A.V., Taranov V.A. Current status in the copper ore processing (review) // *Universities' Proceedings Non-Ferrous Metallurgy*. 2021, no. 3, pp. 4-14. doi.org/10.17073/0021-3438-2021-3-4-14.
4. Thivierge A., Bouchard J., Desbiens A. Unifying High-Pressure Grinding Rolls Models // *Minerals Engineering*. 2022, vol. 178, p. 107427. doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107427.
5. Can M., Altun O. Performance Comparison of the Vertical and Horizontal Oriented Stirred Mill: Pilot Scale IsaMill vs. Full-Scale HIGMill // *Minerals*. 2023, vol. 13, no. 3, p. 315. https://doi.org/10.3390/min13030315.
6. Gomez-Flores A., Ilyas S., Heyes G. W., Kim H. A critical review of artificial intelligence in mineral concentration // *Minerals Engineering*. 2022, vol. 189, p. 107884. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107884.
7. Owusu K.B., Karageorgos J., Greet C. J., Zanin M., Skinner W., Asamoah R. Predicting mill feed grind characteristics through acoustic measurements // *Minerals Engineering*. 2021, vol. 171, p. 107099. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.107099.
8. Wang X., Sun K., Zhang H., Xiong W., Yang C. Mill Load Identification Method for Ball milling Process Based on Grinding Signal // *IFAC-PapersOnLine*. 2021, vol. 54, iss. 21, pp. 7-12. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.12.002.
9. Guyot O., Monredon T., LaRosa D., Broussaud A. VisioRock, an integrated vision technology for advanced control of comminution circuits // *Minerals Engineering*. 2004, vol. 17, no. 11-12, pp. 1227-1235. DOI: 10.1016/j.mineng.2004.05.017.

Сведения об авторе:

Струк Глеб Владимирович – аспирант.