

О НЕКОТОРЫХ АСПЕКТАХ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДРОБИЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА РУДОПОДГОТОВИТЕЛЬНОМ ПЕРЕДЕЛЕ

Господариков А.П., Ефимов Д.А.

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург

Ключевые слова: рудоподготовка, дробление, минеральное сырье, валковая дробилка, футеровочные бандажи, моделирование.

Аннотация. Рудоподготовительные процессы являются ключевыми этапами обогащения полезных ископаемых. Сокращение крупности кусков руды (дробление и измельчение) осуществляется специализированными машинами – дробилками и мельницами, в которых реализуются различные механизмы разрушения. Данные процессы являются весьма энергоемкими по сравнению с последующими этапами обогащения полезных ископаемых. Снижение затрат на электроэнергию, повышение ресурса, ходимости узлов и агрегатов и коэффициента полезного действия дробильных агрегатов на рудоподготовительном переделе являются ключевыми вопросами горной отрасли. В статье представлен анализ существующих современных подходов повышения эффективности дробильного оборудования на рудоподготовительном переделе, в частности, изучению общих закономерностей рудоподготовительных процессов, исследованию факторов, влияющих на процессы дробления, а также параметров футеровок и футеровочных бандажей валковых дробящих агрегатов.

ABOUT SOME ASPECTS OF IMPROVING THE EFFICIENCY OF CRUSHING EQUIPMENT IN ORE PREPARATION PROCESS

Gospodarikov A.P., Efimov D.A.

Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg

Keywords: ore preparation, crushing, minerals, roll crusher, liners, modelling.

Abstract. Ore dressing processes are the key stages of mineral processing. The reduction of the size of ore lumps (crushing and grinding) is carried out by specialized machines - crushers and mills, which implement various crushing mechanisms. These processes are very energy intensive in comparison with the subsequent stages of mineral processing. Reducing energy costs, increasing the service life, serviceability of components and units and the efficiency of crushing units at the ore dressing stage are the key issues of the mining industry. The paper presents an analysis of existing modern approaches to improving the efficiency of crushing equipment in ore preparation process, in particular, the study of general laws of ore preparation processes, the study of factors affecting crushing processes, as well as parameters of liners and liner bands of roller crushing units.

Введение

Процессы дробления и измельчения минералов является основными этапами процесса подготовки руды. Процессу рудоподготовки уделяется особое внимание, поскольку затраты на него растут в геометрической прогрессии [1, 2]. Для снижения ухудшения свойств руды на современных обогатительных фабриках определяют наиболее рациональный режим работы оборудования путем совершенствования методов обогащения руды, дробильного оборудования, его узлов и футеровок, разработки новых механизмов разрушения породы в рудоподготовительных машинах, а также оптимизации существующих процессов обогащения руды [3].

Актуальность исследования главным образом связана с тем, что рудоподготовительное оборудование имеет ряд недостатков, такие как: низкий ресурс и коэффициент полезного действия, высокая энергоемкость, непостоянство гранулометрической картины дробленого продукта. С другой стороны, руды, поступающие на рудоподготовительный передел, характеризуются низким содержанием ценного компонента и сложным взаимопрорастанием минералов [4, 5]. Данные факторы определяют необходимость усовершенствования существующих рудоподготовительных схем и модернизации оборудования, его основных узлов и футеровок [1].

Цель работы заключается в оценке и определении факторов, влияющих на процессы дезинтеграции полезных ископаемых и в поисках путей модернизации футеровок валковых дробящих агрегатов.

В дробильных аппаратах раскрытие минеральных сростков осуществляется путем сокращения крупности частиц. Элементарный акт разрушения горной породы в рудоподготовительном агрегате порождает образование мелких кусков. В ходе каждого элементарного акта дезинтеграции каждый кусок разрушается по определенному принципу, в зависимости от действующих на него внешних сил, преодолевающих внутренние силы сцепления в минеральных сростках в рабочей зоне дробящего агрегата. Под внешними силами подразумеваются силы, действующие на кусок руды со стороны рабочего органа дробилки [3].

Формулировка научной проблемы

Низкая эффективность дробильного оборудования, обусловленная высокой энергоемкостью, низким ресурсом рабочих органов и их футеровок, непостоянством гранулометрической картины дробленого продукта.

Общие закономерности рудоподготовительных процессов

Минеральное сырье является ключевым ресурсом любой державы. Запасы рудных полезных ископаемых истощаются с каждым годом, при этом потребность в минеральном сырье велика и растет в геометрической прогрессии. В переработку вовлекаются бедные, забалансовые и труднообогатимые руды с низким содержанием ценного компонента.

На современных обогатительных фабриках на рудоподготовительном переделе для дробления рудной массы используются щековые, конусные, валковые (измельчающие валки высокого давления) дробилки, дробилки ударного типа [6-8].

В настоящее время существует две группы взаимосвязанных глобальных проблем, касающихся дробильного оборудования при обогащении:

- технические и конструкционные проблемы (высокая металлоемкость конструкций, низкая эффективность, неравномерный износ рабочих органов);
- технологические проблемы (непостоянство гранулометрической картины, низкий процент раскрытия минеральных сростков).

Наиболее реальным подходом к проблеме выбора и рационализации рабочего режима дезинтегратора является математическое моделирование, включая численные методы, отражающие характер процесса, при котором энергия прикладывается к разрушаемому материалу в рабочей зоне дробилки. Математическое моделирование и методы математического анализа позволяют прогнозировать износ основных рабочих органов оборудования, их узлов, футеровочных бандажей, а также давать прогноз гранулометрического состава продуктов разрушения, прогнозировать раскрытие минеральных агрегатов [9]. Для количественного описания степени дробления было предложено несколько подходов, базирующихся на легко измеряемых величинах. Математические зависимости между затраченной дробильно-измельчительным оборудованием энергией и степенью сокращения крупности называются энергокрупностными соотношениями или энергетическими законами дробления.

Развитие математического моделирования процессов разрушения руды и их потенциал для практического применения является результатом развития программного обеспечения, позволяющего обрабатывать огромные массивы данных [1]. Математические модели дробильных и измельчительных аппаратов условно делятся на два основных класса – эмпирические и фундаментальные.

Факторы, влияющие на процессы рудоподготовки

Наиболее интенсивный абразивный износ в ходе процессов рудоподготовки терпят основные рабочие органы, футеровки и футеровочные бандажи. К настоящему времени проведено множество теоретических и экспериментальных исследований по обоснованию и

подбору параметров футеровок для различного вида рудоподготовительного оборудования. Разработаны как математические модели, так и физические образцы элементов футеровок для плит щековых дробилок, конусов для конусных дробилок.

Большое применение к настоящему времени находят валковые дробилки, которые применяются как в стационарных условиях, так и в передвижных мобильных установках. Современные валковые дробящие агрегаты весьма компактны, вследствие чего требуют меньших фундаментов, чем традиционные конусные и щековые дробилки [10].

Исследований и разработок футеровок для валковых дробилок проводилось значительно меньше по сравнению с другими видами дробилок. Футеровочные бандажки подразделяются на цельные кольцевые, кольцевые и сегментарные составные, по рельефности они могут быть исполнены зубчатыми, гладкими, рифлеными поверхностями.

Конфигурация футеровочных бандажей валов определяется в соответствии с абразивными свойствами разрушаемого материала. В случаях работы валковых дробящих агрегатов на рудном сырье чаще всего используются цельные стальные бандажки, на поверхности которых формируется плотная сетка сверленных отверстий. В отверстия вклеиваются защитные штифты из карбида вольфрама. Во время работы бандажки такой конфигурации на поверхности между штифтами образуется самофутерующий слой рудного материала, который защищает сталь от преждевременного износа [8]. Наряду со стальными бандажками в настоящее время приобретают популярность комбинированные футеровки, которые изготавливаются из современных высокотехнологичных материалов – биметаллы и резина-керамика. Использование данных материалов упрощает задачу защиты от износа в абразивнонагруженных узлах горных машин [11].

Важным параметром с точки зрения коэффициента использования оборудования (КИО) является время замены бандажки, определяемое в основном проектно-компоновочным решением узла дробилки и инфраструктурой предприятия. Обогащительные фабрики типично имеют запасную пару валков, что позволяет свести время простоя при замене к двум лишь дням. Изношенные же бандажки могут быть демонтированы и отправлены на восстановление.

В рудной промышленности наибольшее распространение получили цельные кольцевые бандажки, которые натягиваются на валы после нагревания и сегментарные бандажки (рис. 1). Использование цельных кольцевых бандажей обусловлено рядом преимуществ, среди которых более низкие эксплуатационные затраты, повышенный срок службы и возможность работы при очень высоких давлениях.

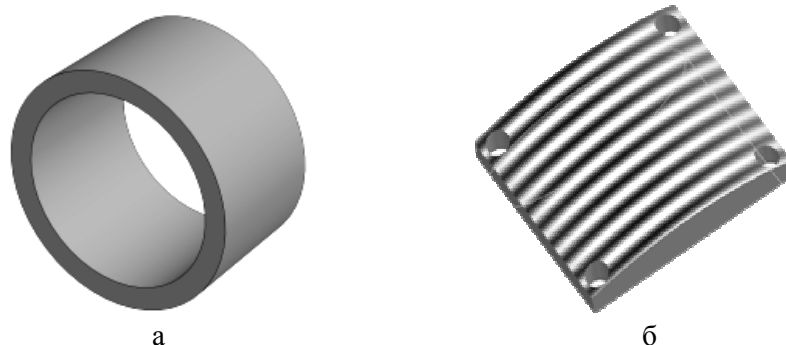


Рис. 1. Цельные кольцевые бандажки (а) и сегментарные бандажки (б) (составлено авторами)

Основными технологическими показателями работы валковых дробящих агрегатов, как рудоподготовительного аппарата, являются производительность, степень сокращения крупности разрушаемого материала и удельный расход энергии.

Производительность зависит от ряда факторов, связанных с параметрами самой машины, свойствами руды и конфигурацией питания. К параметрам машины в данном контексте следует отнести тип поверхности футеровочного бандажки, измельчающее усилие, отношение ширины валка к его диаметру, скорость вращения валков и отношение ширины валка к его диаметру; к свойствам руды – плотность, влажность, прочность, гранулометрический состав и размер максимального куска.

Исследования в области оптимизации рудоподготовительного передела

На нынешнем этапе развития горной отрасли актуально направление модернизации рабочих органов рудоподготовительного оборудования, его основных узлов и усовершенствование футеровок (во избежание абразивного износа рабочих органов). Данные направления позволяют не только добиться повышения эффективности дробления, но и увеличить ресурс машины. Исследователями предлагаются различные формы и конструкции валков и футеровочных бандажей. Так были предложены конструкции валка, состоящая из пластин в форме треугольника Рело (рис. 2,а), валка с режущими элементами и валков цилиндрической формы (рис. 2,б). При использовании модернизированных конструкций валков реализуется перемещение рудной массы в двух направлениях, то есть осуществляется перемещение руды в двух координатах, что способствует возрастанию эффективности дробления [6, 8].

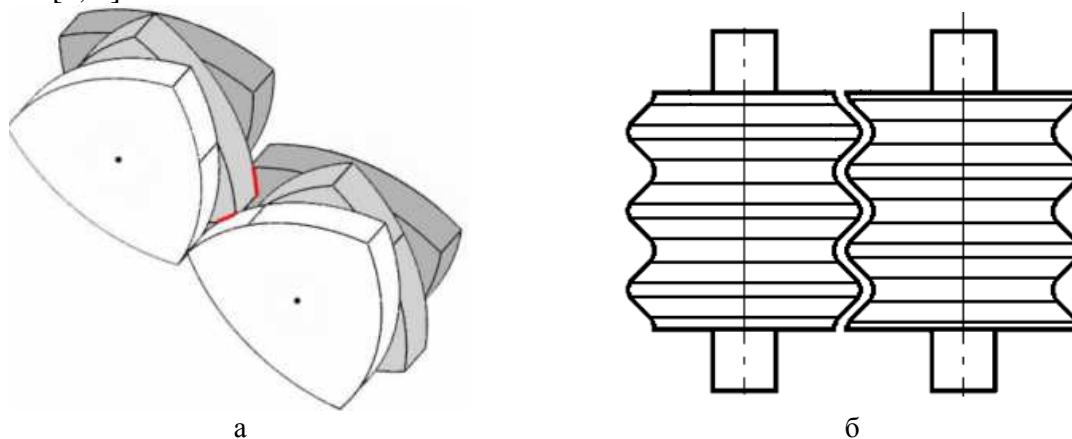


Рис. 2. Модульная конструкция валков, состоящая из пластин в форме треугольника Рело (а) и валки с режущими элементами цилиндрической формы (б)

Авторами статьи продолжены исследования в области модернизации валковых дробящих агрегатов. Предложено использование валков с цельными кольцевыми гладкими футеровочными бандажами с профилем в форме треугольника Рело. Футеровочный бандаж имеет небольшой угол конусности для удобства монтажа на вал (рис. 3). Треугольник Рело как геометрическая фигура имеет постоянную ширину, вследствие этого расстояние между валками имеет постоянное значение и угол захвата меньше двойного угла трения (необходимое условие для нормальной работы дробящего агрегата).

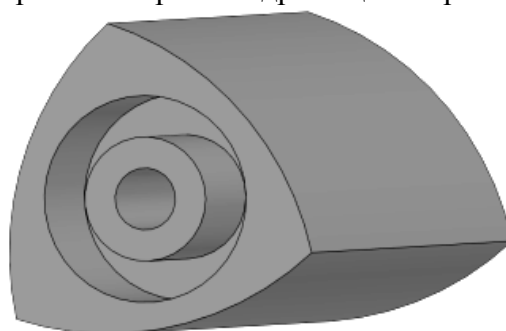


Рис. 3. Модель валков с футеровочным бандажом с профилем в форме треугольника Рело [12]

Главные преимущества использования валков с футеровочными бандажами с профилем в виде треугольника Рело можно разделить на три группы.

1. Снижение металлоемкости конструкции за счет уменьшения площади поперечного сечения на 10% (по сравнению в круглыми валками), уменьшается масса валка и сопутствующих элементов в узлах.

2. Уменьшение динамических нагрузок. Снижение крутящего момента привода дробящего агрегата; ввиду возникающей в рабочей зоне дробилки системы циклических сил снижаются нагрузки на рабочие органы и узлы дробилки.

3. Повышение эффективности дробления. Увеличение удельного усилия сжатия на слой руды способствует более интенсивному дроблению материала в зоне сжатия.

Заключение

Модернизация дробящих агрегатов, работающих с высокой энергоэффективностью и необходимыми технико-технологическими показателями, является весьма актуальным вопросом для изучения и проблемой для современной рудоподготовительной отрасли.

Несмотря на то, что направления по решению указанных проблем уже намечены и постепенно приносят положительные результаты. Данная область исследований остается актуальной и требует к себе повышенного внимания. Желаемые показатели работы рудоподготовительного оборудования еще не достигнуты и исследования в данной области следует продолжать. Вопросы модернизации валков, футеровочных бандажей, а также математическое моделирование раскрытия минеральных сростков видятся актуальными для изучения.

Потребность в оборудовании, которое может обеспечить необходимую производительность, гранулометрическую характеристику дробленной массы и раскрытие сростков в высокой степени остается велика. Разработка и модернизация рудоподготовительного оборудования и его узлов, а также футеровочных бандажей представляется наиболее перспективным направлением.

Список литературы

1. Nikitin A.G., Laktionov S.A., Medvedeva K.S. Diagnosis of the rock crushing modes to increase the efficiency of one-roll crusher operation // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017, vol. 84, no. 1, p. 012033. DOI: 10.1088/1755-1315/84/1/012033.
2. Александрова Т.Н., Николаева Н.В., Ромашев А.О., Львов В.В. Повышение эффективности переработки руд драгоценных металлов на основе моделирования процессов // Обогащение руд. – 2019. – №2. – С. 8-13. – DOI: 10.17580/or.2019.02.02.
3. Morrell S. Predicting the overall specific energy requirement of crushing, high pressure grinding roll and tumbling mill circuits // Minerals Engineering. 2009, vol. 22, no. 6, pp. 544-549. DOI: 10.1016/j.mineng.2009.01.005.
4. Афанасова А.В., Абурова В.А., Прохорова Е.О., Лушина Е.А. Исследование влияния депрессоров на флотационные порообразующие минералы при флотации сульфидных золотосодержащих руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – №6-2. – С. 161-174. – DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_161.
5. Александрова Т.Н., Кузнецов В.В., Иванов Е.А. Исследование влияния ионов жесткости воды на флотиримость медно-никелевых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – №6-1. – С. 263-278. – DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_263.
6. Krivov D.A., Gordeev Y.I., Krivova D.D. Simulation of the stress-strain state of the combined rolls plates in the form of a Reuleaux Triangle Profile roller grinder // Journal of Physics: Conference Series. 2019, vol. 1353, no. 1, p. 012076. DOI: 10.1088/1742-6596/1353/1/012076.
7. Титов А.А. Модернизация валковых дробилок для повышения эффективности разрушения прочных пород // Геотехническая механика. – 2018. – №141. – С. 176-183. – DOI: 10.15407/geotm2018.141.176.
8. Klymowsky R., Patzelt N., Knecht J., Burchardt E. Selection and sizing of high pressure grinding rolls // Mineral processing plant design, practice and control proceedings. 2002, vol. 1, pp. 636-668.
9. Daniel M.J., Morrell S. HPGR model verification and scale-up // Minerals Engineering. 2004, vol. 17, no. 11-12, pp. 1149-1161. DOI: 10.1016/j.mineng.2004.05.016.
10. Lieberwirth H., Hillmann P., Hesse M. Dynamics in double roll crushers // Minerals Engineering. 2017, vol. 103, pp. 60-66. DOI: 10.1016/j.mineng.2016.08.009.
11. Maksarov V.V., Keksin A.I., Filipenko I.A. Improvement of magnetic-abrasive finishing of nonuniform products made of high-speed steel in digital conditions // Key Engineering Materials. 2020, vol. 836, pp. 71-77. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.836.71.
12. Ефимов Д.А., Господариков А.П. Технические и технологические аспекты использования валков с профилем в виде треугольника Релло в дробильных агрегатах при обогащении руды // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – №10-2. – С. 117-126. – DOI: 10.25018/0236_1493_2022_102_0_117.

References

1. Nikitin A.G., Laktionov S.A., Medvedeva K.S. Diagnosis of the rock crushing modes to increase the efficiency of one-roll crusher operation // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017, vol. 84, no. 1, p. 012033. DOI: 10.1088/1755-1315/84/1/012033.

2. Alexandrova T.N., Nikolaeva N.V., Romashev A.O., Lvov V.V. Increasing the efficiency of ore processing for precious metals based on process modeling // Ore Enrichment. 2019, no. 2, pp. 8-13. DOI: 10.17580/or.2019.02.02.
3. Morrell S. Predicting the overall specific energy requirement of crushing, high pressure grinding roll and tumbling mill circuits // Minerals Engineering. 2009, vol. 22, no. 6, pp. 544-549. DOI: 10.1016/j.mineng.2009.01.005.
4. Afanasova A.V., Aburova V.A., Prokhorova E.O., Lushina E.A. Study of the impact of depressors on flotation rock-forming minerals in flotation of sulfide gold-bearing ores // Mining Information and Analytical Bulletin. 2022, no. 6-2, pp. 161-174. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_161.
5. Alexandrova T.N., Kuznetsov V.V., Ivanov E.A. Study of the effect of water hardness ions on the flotability of copper-nickel ores // Mining Information and Analytical Bulletin. 2022, no. 6-1, pp. 263-278. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_263.
6. Krivov D.A., Gordeev Y.I., Krivova D.D. Simulation of the stress-strain state of the combined rolls plates in the form of a Reuleaux Triangle Profile roller grinder // Journal of Physics: Conference Series. 2019, vol. 1353, no. 1, p. 012076. DOI: 10.1088/1742-6596/1353/1/012076.
7. Titov A.A. Modernization of roller crushers to improve the efficiency of breaking tough rocks // Geotekhnichnna mekhanika. 2018, no. 141, pp. 176-183. DOI: 10.15407/geotm2018.141.176.
8. Klymowsky R., Patzelt N., Knecht J., Burchardt E. Selection and sizing of high pressure grinding rolls // Mineral processing plant design, practice and control proceedings. 2002, vol. 1, pp. 636-668.
9. Daniel M.J., Morrell S. HPGR model verification and scale-up // Minerals Engineering. 2004, vol. 17, no. 11-12, pp. 1149-1161. DOI: 10.1016/j.mineng.2004.05.016.
10. Lieberwirth H., Hillmann P., Hesse M. Dynamics in double roll crushers // Minerals Engineering. 2017, vol. 103, pp. 60-66. DOI: 10.1016/j.mineng.2016.08.009.
11. Maksarov V.V., Keksin A.I., Filipenko I.A. Improvement of magnetic-abrasive finishing of nonuniform products made of high-speed steel in digital conditions // Key Engineering Materials. 2020, vol. 836, pp. 71-77. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.836.71.
12. Efimov D.A., Gospodarikov A.P. Technical and technological aspects of using rolls with a profile in the form of a Rello triangle in the crushing units at the ore preparation process // Mining Information and Analytical Bulletin. 2022, no. 10-2, pp. 117-126. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_102_0_117.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Господариков Александр Петрович – академик МАНЭБ, академик РАЕН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой высшей математики	Gospodarikov Alexander Petrovich – academician of International academy for ecology, human and natural security, academician of Russian academy of natural sciences, doctor of technical sciences, professor, head of Department of higher mathematics
Ефимов Денис Александрович – аспирант efimov.d.aleksa@mail.ru	Efimov Denis Alexandrovich – postgraduate student

Получена 13.01.2023