

УДК 622.73

**В.И. ГОЛОВАНЬ,**

**Г.Г. ГУБИН, Л.В. СКЛЯР,** канд. техн. наук

(Украина, Кривой Рог, Государственное ВУЗ "Криворожский национальный университет")

## **КОРОТКАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ДЛЯ ОБОГАЩЕНИЯ МАГНЕТИТОВЫХ РУД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ДРОБИЛОК ТИПА HPGR**

Общемировой спад, охвативший в последнее время рынок железорудного сырья, продолжается, так стоимость австралийского материала с 62% Fe<sub>tot</sub> незначительно превышает отметку \$40-50 за т. Основным потребителем рудного сырья был Китай. Спрос на руду в этой стране сокращается вследствие уменьшения объемов выплавки стали, поэтому в обозримом будущем особого роста цен на железную руду и концентрат не предвидится.

Мировые цены на крупнокусковую руду и окатыши несколько выше, а на железорудный концентрат – ниже. Практически никто из лидеров по производству железорудного сырья: BHP Billiton, Vale, RioTinto – о сокращении добычи оглашать не спешат и не видят логики в снижении собственного производства [1, 2].

В связи с этими тенденциями, уже для выживания, а не для показателей, назрела необходимость сокращения затрат на производство концентрата. Для переоснащения фабрик спад на мировых рынках сырья – самое благоприятное время чтобы провести глубокую модернизацию.

Одним из существенных факторов, позволяющих снизить затраты на производство железорудных концентратов, по мнению авторов, является изменение топологии существующих "классических" технологических схем для обогащения магнетитовых руд в сторону сокращения всех основных операций и сведения их до необходимого и достаточного минимума [3].

Предлагаемые технологические схемы, как правило, включают в себя: крупное, реже среднее дробление, один прием измельчения и одну стадию магнитной сепарации.

Сегодня почти все основные производители горного оборудования такие, как: ThyssenKrupp, FLS, MetsoMinerals, Outotec и др. выпускают дробилки типа HPGR или ИВВД – измельчающие валки высокого давления.

Все основные производители активно продвигают свои аппараты на рынке, внедряют в существующие и вновь строящиеся фабрики, разрабатывают и испытывают технологию HPGR. Сегодня модно считать, что измельчающие валки высокого давления (HPGR) представляют собой недостающее звено в цикле измельчения, что позволяет компаниям предложить клиентам несколько вариантов решений в соответствии с требованиями заказчиков к процессу измельчения.

Технология измельчения в валках высокого давления появилась в середине

## **Загальні питання технологій збагачення**

80-х годов XX столетия. Приоритет ее создания принадлежит профессору Шонерту (Schonert, патент 1986 года). С середины 20-го века валковые прессы начали использовать в различных областях промышленности. Первоначальное применение в основном было сосредоточено на процессах в области брикетирования и компактирования сыпучих материалов.

Весьма важным является то, что дробилки HPGR имеют высокую производительность, достигающую до 2,5 тыс. т/ч, а это сравнимо с пропускной способностью мельниц полусамоизмельчения. Усиливается интерес к пресс-валковым дробилкам еще и потому, что они обеспечивают сокращение капитальных вложений и эксплуатационных расходов на рудоподготовку в сравнении с полусамоизмельчением. Сравнение капитальных и операционных затрат в циклах дробления для проектируемого предприятия производительностью 35 млн тонн руды в год. представлены в таблице 1.

*Таблица 1*

Сравнение капитальных и операционных затрат для циклов дробления

Схема	Капитальные затраты	Операционные расходы	Чистый дисконтированный доход
	(M\$USD)	(USD\$/t)	(M\$USD)
Сухой процесс дробилкой HPGR	860,00	44,30	3 579,00
Полусамоизмельчение замкнутый цикл	857,00	48,40	3 042,00

В сочетании с современными мощными конусными дробилками они могут составить серьезную конкуренцию технологии полусамоизмельчения. При незначительном превышении в капитальных затратах наблюдается снижение операционных расходов и повышение дохода в случае использования дробилок типа HPGR.

Одним из главных преимуществ данной технологии, в сравнении с традиционными методами дезинтеграции руд, является значительное сокращение энергопотребления до 0,9-3 кВт·ч/т. Кроме того, технология раздавливания рудных частиц в слое дает ряд существенных преимуществ для последующих процессов обработки по причине более щадящего раскрытия рудных зерен. Например, улучшение кинетики при выщелачивании и флотации, связанное с уникальным свойством пропагации трещин частиц материала после обработки на HPGR [4], снижение потерь магнетита в результате снижения количества сростков, которые в большом количестве образуются при преобладании ударного разрушения, например в барабанных шаровых мельницах.

Условно к недостаткам дробления в HPGR можно отнести то, что средний размер куска в питании не должен превышать 50-70 мм, т.е. в технологической схеме обязательно остается дробилка среднего дробления.

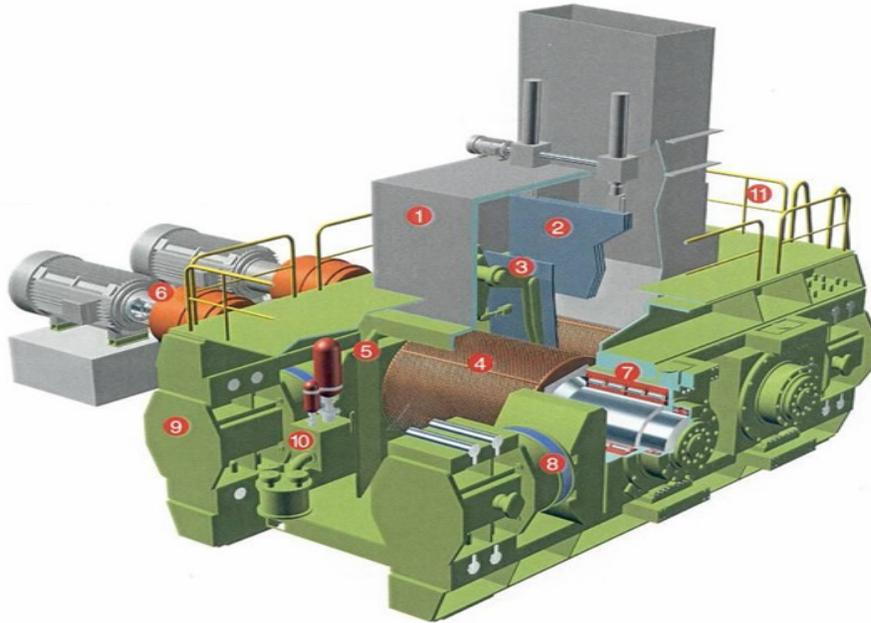


Рис. 1. Роллер-пресс фірми KHD:

- 1 – загрузочное устройство; 2 – дозирующая заслонка;
- 3 – регулирующая заслонка; 4 – валки роллер-пресса; 5 – инспекционная дверь;
- 6 – приводы валков через карданный вал и редуктор;
- 7 – цилиндрические роликовые подшипники;
- 8 – прижимные гидравлические цилиндры;
- 9 – рама; 10 – гидравлическая система сжатия;
- 11 – платформа оператора

Технологические схемы с использованием дробилок типа HPGR, там, где это применимо, имеют преимущества: более низкое удельное энергопотребление, сокращение расхода или исключение применения размольных тел, сокращение площади под размещение установки, более короткое время пуска-наладочных работ, более высокую эксплуатационную готовность оборудования в сопоставлении с эквивалентными схемами самоизмельчения, полусамозмельчения, шарового измельчения.

В процессе изучения процесса разрушения минеральной частицы между валками и между самими минеральными частицами доказано, что сжатие минеральной частицы между двумя рабочими органами (плитами, валками, и т.п.) приводит к измельчению только сжимаемой частицы, причем такой вид разрушения приводит к образованию различного типа сrostков, тогда как сжатие частицы между другими минеральными частицами приводит к разрушению всех находящихся в контакте частиц. В этом случае для достижения необходимой крупности продукта требуется значительно, почти на порядок, меньше энергии, расходуемой на такую же процедуру барабанными шаровыми мельницами [5].

Профессор Московского горного университета С.А. Гончаров, развивая

теорию разрушения твердых тел Гриффитса применительно к рудам, установил, что у железистых кварцитов со слоистой текстурой, отношение размеров минеральных зерен слагающих кварциты в направлении параллельном слоистости в 1,5 раза больше размера этих же зерен в направлении перпендикулярном слоистости. Следовательно, площадь срастания в направлении параллельном слоистости, будет в 2,25 раза больше площади срастания в направлении перпендикулярном их слоистости. Таким образом, чтобы при измельчении железистых кварцитов эффективно раскрыть зерна извлекаемого минерала на площадке срастания необходимо затрачивать разное, избирательное количество энергии, это трудно реализовать в шаровых мельницах и практически полностью реализуется при межчастичном, объемном разрушении в слое измельчаемого материала для дробилок HPGR.

Принцип измельчения в дробилках типа HPGR основан на эффекте межчастичного разрушения, раздавливания. Два валка вращающихся в противоположных направлениях, между которыми сжимается материал, являясь рабочими органами, на самом деле просто передают усилие, требуемое для разрушения минеральных частиц. Давление передается через вращающиеся валки на слой минеральных частиц и основная часть процесса разрушения происходит уже в слое частиц, т.е. непосредственно измельчающими рабочими органами в данном случае, можно считать сами частицы. Дробление одного хрупкого минерального зерна между двумя дробильными поверхностями означает дробление только этого зерна, в то время как дробление одного зерна между двумя другими зернами приводит к дроблению всех трех зерен [6].

Высокая степень сжатия слоя материала локально активизирует дифференциальные усилия на контактах рудных зерен с вмещающей породой в минеральных сростках. Это усиливает процессы высвобождения минералов при различных способах обогащения. Повышается извлечение полезного компонента. Снижается рабочий индекс Бонда BWi для большинства руд на 10-25%. Это утверждение успешно подтвердилось при проведении пилотных тестов на полупромышленной установке в лаборатории SGA (Studiengesellschaft für Eisenerzaufbereitung GmbH & Co. KG, Германия).

При проведении тестов на магнетитовой руде месторождения Кривого Рога в лаборатории SGA рабочий индекс Бонда(BWi), после дробления в открытом цикле в дробилке HPGR, снизился с 14,2 до 11,7 кВт·ч/т, что составляет почти 17% [7]. При значительных объемах переработки это серьезное снижение расхода электроэнергии, особенно в случае применения шаровых мельниц.

Максимальный размер подаваемого куска определяется диаметром валков. Как правило, он приблизительно равен 5% от диаметра валка и в 1,2-1,3 раза меньше рабочего зазора. Размер рабочего зазора приблизительно соответствует толщине слоя и определяется на основе свойств измельчаемого материала и установок самого пресса. Ниже приведен анализ параметров валкового пресса [8].

Удельная пропускная способность роллер-пресса, в основном, зависит от свойств материала: твердость, физическая плотность материала, гранулометри-

ческий состав исходного материала, содержание влаги, давления при дроблении, а также от типа поверхности используемых валков.

Однако, удельная пропускная способность зависит только в ограниченной степени от диаметра и скорости вращения валков, и, следовательно, является важным параметром для определения пропускной способности от тестового блока до полномасштабной промышленной установки.

Усилие, передаваемое через гидравлическую систему на валки и необходимое для дробления руды, выражается, как конкретная сила измельчения и дает количественную оценку силы измельчения, которая применяется к валкам, в виде удельной нагрузки. Это выражается как общее гидравлическое усилие, воздействующее на валки, деленное на площадь проекции валков в единицах и рассчитывается в Н/мм<sup>2</sup>:

$$\varphi = \frac{F}{1000 \cdot D \cdot L}, \quad (1)$$

где  $\varphi$  – усилие измельчения, Н/мм<sup>2</sup>;  $F$  – сила измельчения, кН;  $L$  – ширина валка, м;  $D$  – диаметр валка, м.

Удельная энергия потребляемой мощности  $W_{(SP)}$  характеризует энергию, которая поглощается при дроблении одной тонны руды. Она пропорциональна приложенной конкретной силе дробления:

$$W_{(SP)} \sim c(\varphi, m) \cdot (\varphi / m), \quad (2)$$

где  $W_{(SP)}$  – удельная потребляемая мощность, кВт·ч/т;  $\varphi$  – усилие измельчения, Н/мм<sup>2</sup>;  $m$  – удельная пропускная способность, (тс/(м<sup>3</sup>·ч));  $c(\varphi, m)$  – фактор (функция  $c$  от  $\varphi$  и  $m$ ).

Схема дробления (рис. 2) для HPGR и традиционных конусных дробилок различаются. Так если для конусных дробилок рекомендуется предварительное грохочение, чтобы убрать рудную мелочь из питания дробилки, то для дробилок HPGR наоборот рекомендуется замкнутый цикл с поверочным грохочением, в данном случае мелочь необходима для оптимизации гранулометрической характеристики питания дробилок HPGR.

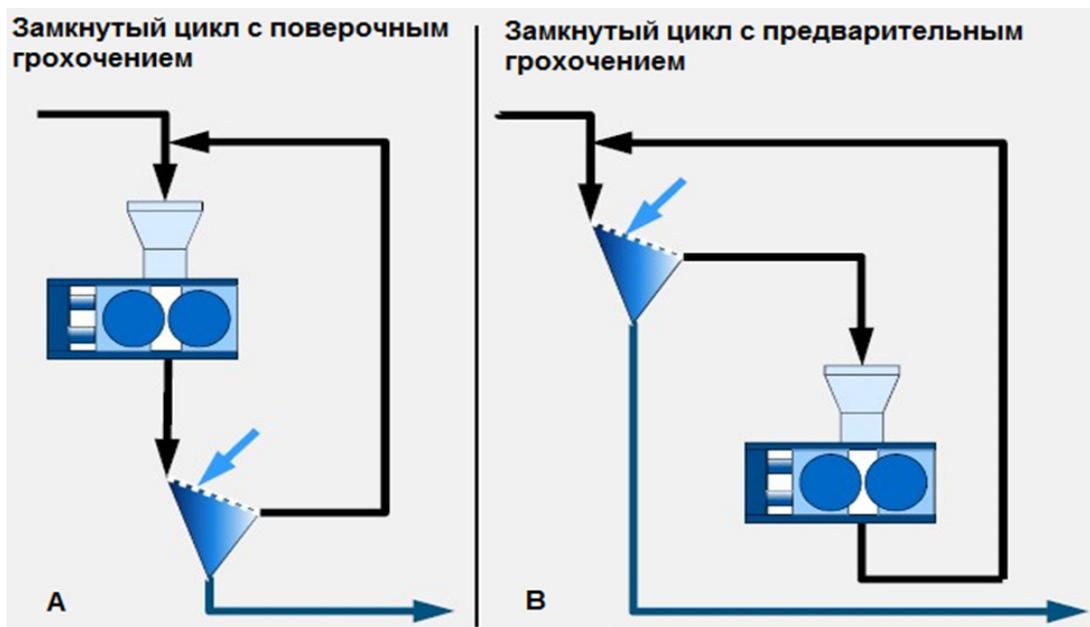


Рис. 2. Схемы дробления:

А – схема дробления с поверочным грохочением;

В – "классическая схема" дробления с предварительным грохочением

Количество свежего (исходного) питания цикла дробления в варианте В для HPGR снижается, но с другой стороны, удельная пропускная способность ( $M_{dot}$ ) является меньше. Это два противоположных эффекта. В случае варианта В также снижается срок службы ролл, это связано с тем, что в питании HPGR, по варианту В, содержится меньше мелких частиц по сравнению с вариантом А. Потребление энергии шаровой мельницей может быть выше после варианта В, это связано с загрузлением разгрузки HPGR. В случае компоновки схемы по варианту А в питание HPGR поступает более широко классифицированный материал, что способствует более полному и соответственно более плотному заполнению рабочей зоны. При этом снижается количество пустот между частицами одинакового размера это в свою очередь повышает эффективность работы дробилки т.к. снижаются затраты энергии на уплотнение дробимого материала в рабочей зоне.

Как пример приводится компоновка технологической схемы на руднике LosColorados. Роллер-пресс производства компании KHD, работающий на железорудной обогатительной фабрике на руднике LosColorados, был первой крупномасштабной установкой, заменившей третью и четвертую стадии дробления железных руд. Роллер-пресс был сдан в эксплуатацию в ноябре 1998 г. [9]. На руднике LosColorados перерабатываются различные типы руд, включая твердые и мягкие руды. Различные свойства руд означают и различное распределение размеров частиц после первой и второй стадий дробления, а также после прохождения материала через роллер-пресс. При средней твердости руды циркуляционная нагрузка надрешетного продукта грохота составляет около 35%.

## Загальні питання технологій збагачення

Роллер-пресс заменил две стадии дробления: третью, на которой потребовалась бы установка конусных дробилок, и четвертую, на которой потребовалась бы установка гирационных конусных дробилок, а также ряда вспомогательного оборудования (конвейеров, бункеров, желобов, измерительной аппаратуры и т.д.). В результате имело место значительное снижение общей себестоимости измельчения. Роллер-пресс производительностью 2000 т/ч потребовал только около 100 м<sup>2</sup> площади.

*Таблица 2*

Технические и рабочие параметры роллер-пресса на руднике LosColorados	
Перерабатываемый материал	Крупная железная руда
Влажность питания, %	0-1
Крупность питания, мм	-63...+0
Крупность продукта, мм	55-70% <6,3
Производительность, т/ч	2000
Энергопотребление, кВт·ч/т	0,8-1,2
Наработка штифтованного бандажа, ч	14600

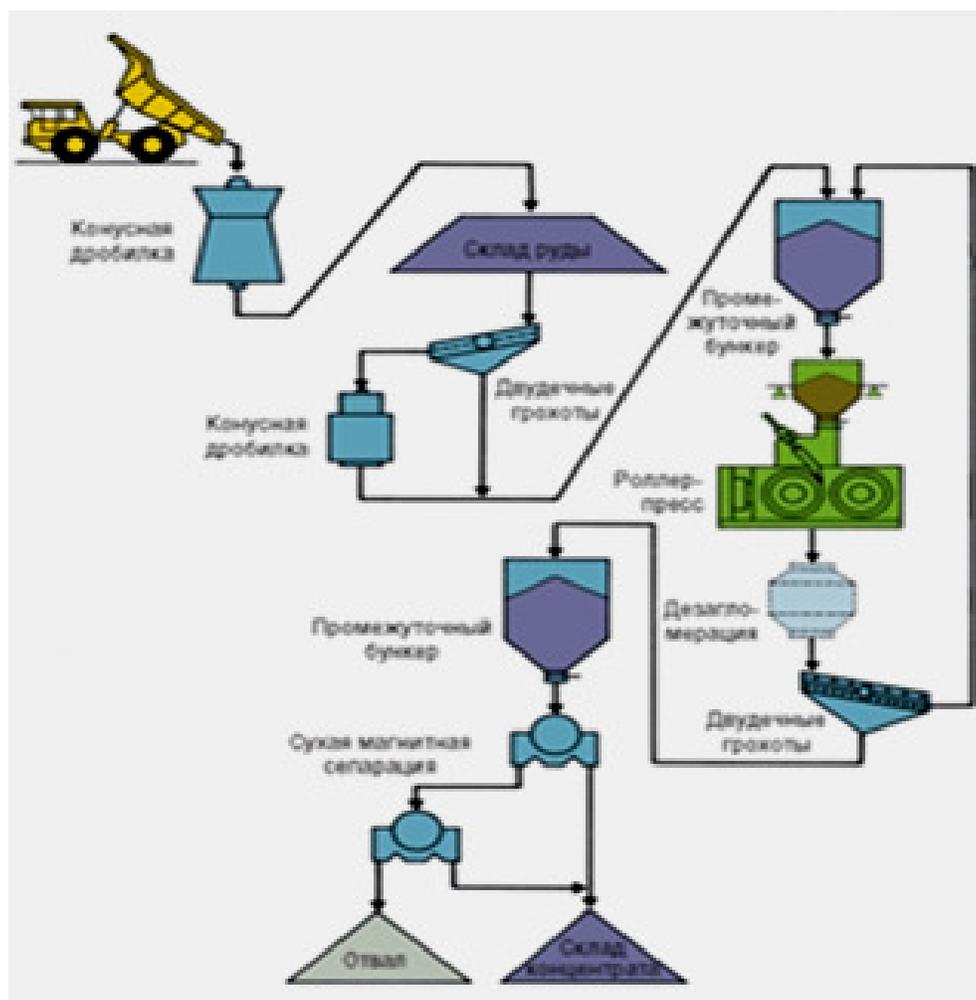


Рис. 3.Схема цепи аппаратов рудника LosColorados

## Загальні питання технологій збагачення

Выход мелких фракций (крупность частиц <150 мкм), образуемых в роллер-прессе, был вдвое большим, чем при традиционной схеме третьей и четвертой стадий дробления. Это создало значительные преимущества для дальнейшего технологического процесса, включая улучшенное качество магнитного грубого концентрата, с равным или даже увеличенным выходом продукта. Кроме того, на фабрике HuascoPellet (заказчик рудника LosColorados), которая получает грубый магнитный концентрат, отмечено более низкое потребление энергии при мокром измельчении в барабанных мельницах до получения высококачественных окатышей, наряду с уменьшением циркуляционной нагрузки мельниц. Это позволяет увеличить производительность шаровой мельницы на 30% (с 210 до 280 т/ч).

Для определения технологических основных показателей проведены исследования по дроблению до разной заданной крупности магнетитовых кварцитов Криворожского бассейна в дробилке HPGR. Содержание класса минус 70 мкм в разгрузке дробилки HPGR, при заданной крупности дробления 80% класса минус 1,3 мм, составляет более 20%.

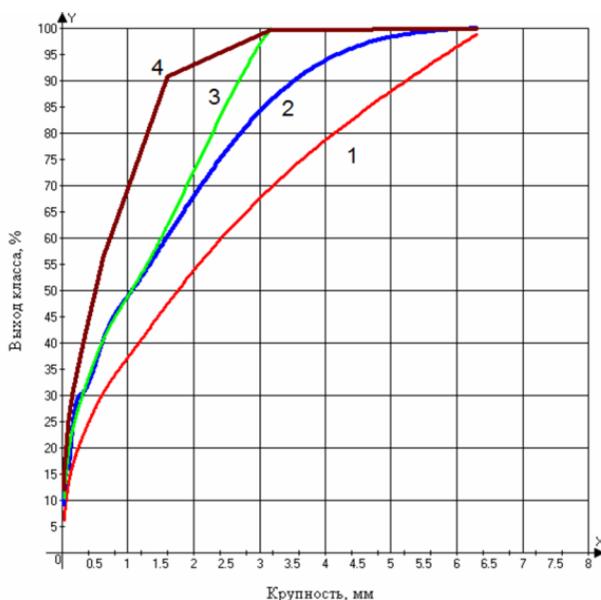


Рис. 4. Гранулометрическая характеристика дробленой магнетитовой руды:

- 1 – 80% класса -4,3 мм; 2 – 80% класса -2,7 мм;
- 3 – 80% класса -2,3 мм; 4 – 80% класса -1,3 мм

В первых стадиях шарового измельчения этот показатель изменяется от 30 до 50%. Усилия, создаваемые в рабочей зоне дробилки HPGR, значительно превосходят величины необходимые для разрушения рудных частиц [9]. Это дает основание для разработки короткой технологической схемы [10] с технологией сухого измельчения и классификации без применения барабанных шаровых мельниц. На примере фрагмента цикла измельчения (рис. 5) показана возможность работы дробилки HPGR в замкнутом цикле с сухим гибридным сепаратором.

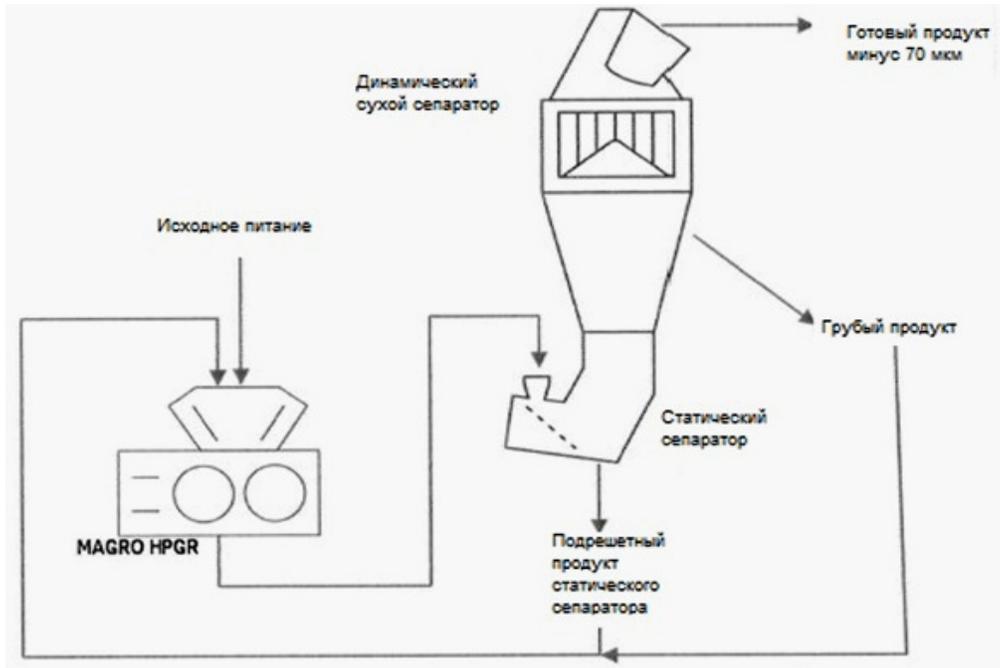


Рис. 5. Дробилка HPGR в замкнутом цикле с сухим гибридным сепаратором

Сухой гибридный сепаратор состоит из статической части для отделения крупного материала из дробленого продукта и динамической части для выделения готового по крупности продукта. Материал из дробилки подается в статическую часть гибридного сепаратора, в которой происходит отделение крупного материала, далее воздушным потоком тонкая фракция возносится к динамической части гибридного сепаратора. В динамической части гибридного сепаратора происходит разделение на готовый по крупности продукт и грубый продукт. Грубый и крупный продукты возвращаются в дробилку в виде циркуляционной нагрузки, а готовый по крупности продукт направляется в силосный бункер для накопления или дальнейшей переработки.

Сегодня фирма ThyssenKrupp предлагает использовать дробилки HPGRPOLYCOM собственного производства в системах конечного помола, в том числе и для магнетитовых руд.

Также ведутся исследования в области доизмельчения концентратов с целью повышения качества, получения оптимальной крупности для производства окатышей, флотационной доводки и т.п. Проведенные тесты показывают возможность увеличения поверхности железорудных концентратов до 300 ед. по Блэйну, за один проход через систему HPGR.

Использование завершающего помола в дробилках HPGRPOLYCOM позволяет максимально экономить электроэнергию. По сравнению с обычной шаровой мельницей измельчительные системы POLYCOM, экономят до 50% энергии. Дробилка HPGRPOLYCOM успешно работает при влажности материала до 6%.

## **Загальні питання технологій збагачення**

На рис. 6 приведен пример короткой технологической схемы на базе дробилки HPGR производительностью 500 т/ч по сырой руде. Короткие технологические схемы, помимо замены существующих "классических" схем на действующих фабриках, возможно устанавливать в виде модульных обогатительных фабрик на борту действующих карьеров или в подземных выработках действующих рудников. В случае размещения такой фабрики под землей на поверхность, возможно, поднимать только готовый концентрат, а хвосты с соответствующими добавками, использовать, как закладочный материал. В этом случае наблюдается явное снижение затрат хотя бы на подъем, т.к. концентрата в разы меньше чем исходной руды.

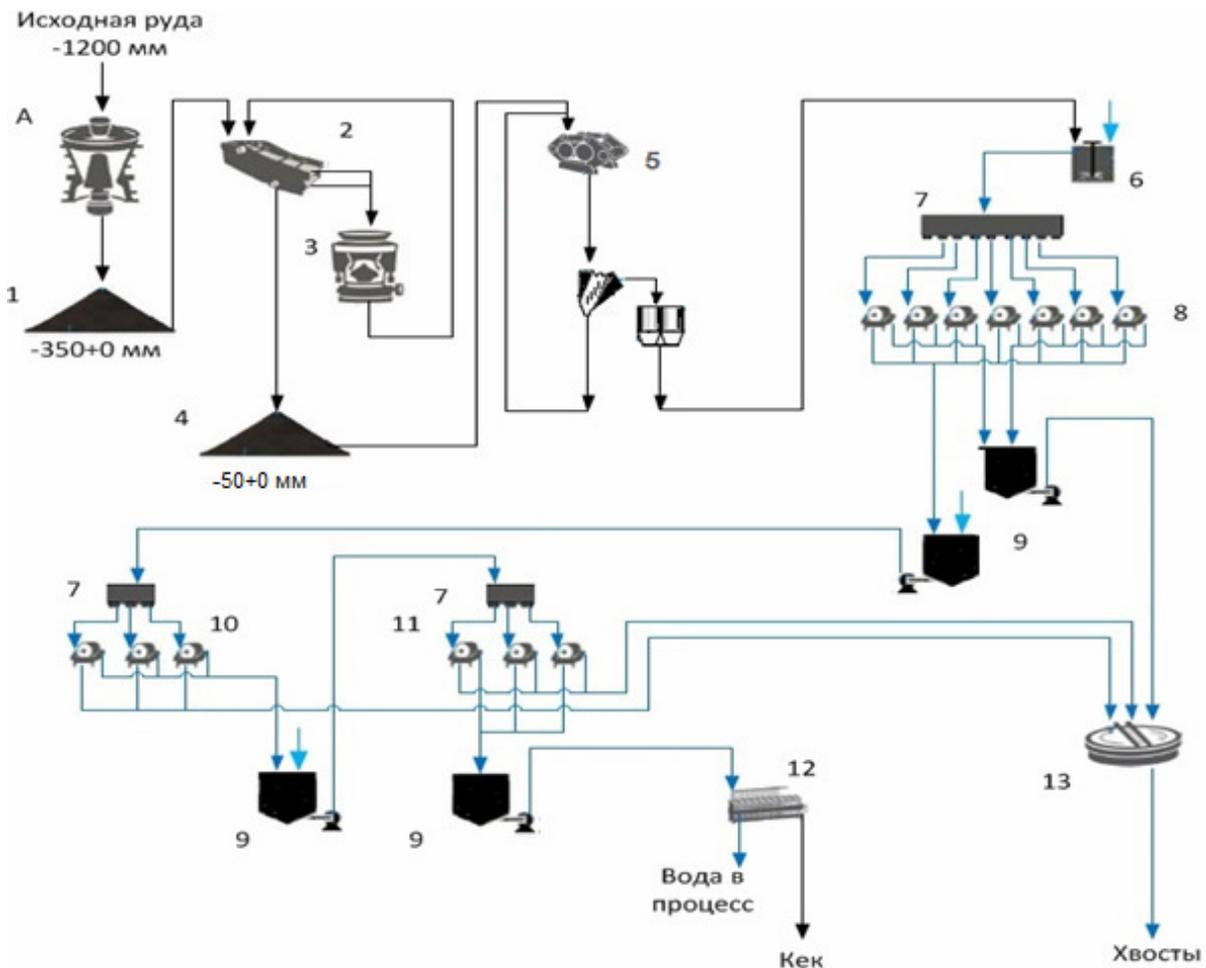


Рис. 6. Короткая технологическая схема на базе узла измельчения с дробилкой HPGR производительностью 500 т/ч по сырой руде:

- А – дробилка ККД; 1 – склад дробленой руды; 2 – грохот; 3 – дробилка КСД;
- 4 – склад дробленой руды; 5 – дробилка HPGR; 6 – смеситель;
- 8 – первый прием мокрой магнитной сепарации; 9 – зумпф с насосом;
- 10 – второй прием мокрой магнитной сепарации;
- 11 – третий прием мокрой магнитной сепарации; 12 – пресс-фильтр;
- 13 – сгуститель для хвостов

Производительность модульной фабрики на борту карьера 500 т/ч по исходной руде, дробление производится до  $P_{80} = 0,8-1$  мм, образуется циркуляция до 300-400%, что соответствует 2000-2500 т/ч на один аппарат. Такую производительность выдает практически любой HPGR для железной руды с диаметром валков не менее 2,2-2,5 м (у MetsoMinerals имеется HPGR с диаметром валков 3 м). Максимальная установочная мощность для машин такого размера около 6000 кВт (2×3000), максимальная производительность до 3200 т/ч, что означает, при выходе 20-25% класса минус 70 мкм, 625 т/ч готового по крупности продукта. Удельный расход энергии 1,87 кВт·ч/т руды или 9,6 кВт ч/т на готовый продукт 98% класса минус 70 мкм. Это значительно меньше расхода энергии шарового измельчения (46-50 кВт ч/т).

### *Выводы*

1. Дробилки HPGR имеют высокую производительность и обеспечивают сокращение капитальных вложений и эксплуатационных расходов на рудоподготовку в сравнении с полусамоизмельчением.

2. Технологические схемы с использованием дробилок типа HPGR имеют преимущества: более низкое удельное энергопотребление, сокращение расхода или исключение применения размольных тел, сокращение площади под размещение установки, более короткое время пуско-наладочных работ, более высокую эксплуатационную готовность оборудования в сопоставлении с эквивалентными схемами самоизмельчения, полу-самоизмельчения, шарового измельчения.

3. Высокая степень сжатия слоя материала в дробилках типа HPGR локально активизирует дифференциальные усилия на контактах рудных зерен с вмещающей породой в минеральных сростках, что приводит снижению рабочего индекса Бонда (BWi) для большинства руд на 10-25%. При проведении тестов на магнетитовой руде месторождения Кривого Рога на полупромышленной установке в лаборатории SGA, (Studiengesellschaft für Eisenerzaufbereitung GmbH & Co. KG, Германия) рабочий индекс Бонда (BWi), после дробления в открытом цикле в дробилке HPGR, снизился с 14,2 до 11,7 кВт·ч/т, что составляет почти 17%.

4. Для определения основных технологических показателей проведены исследования по дроблению до разной заданной крупности магнетитовых кварцитов Криворожского бассейна в дробилке HPGR.

5. Приведен пример короткой технологической схемы на базе дробилки HPGR производительностью 500 т/ч по сырой руде. Такие технологические схемы в виде модульных обогатительных фабрик возможно устанавливать на борту действующих карьеров или в подземных выработках действующих рудников.

### **Список литературы**

1. Австралия уменьшила прогнозные цены на железную руду. Электронный ресурс: **Збагачення корисних копалин, 2015. – Вип. 61(102)**

---

## **Загальні питання технологій збагачення**

<http://e-finance.com.ua/show/196204.html>.

2. Мировой рынок: Roy Hill не считает себя виновным в обвале цен на руду до \$40/тонну. (Uaprom.info/Металл Украины и мира). Электронный ресурс: <http://ukrmet.dp.ua/2015/12/04/mirovoj-rynok-roy-hill-ne-schitaet-sebya-vinovnym-v-obvale-cen-na-rudu-do-40tonnu.html#more-66864>.

3. International Mining, IRONORENEWS Ironoremining. – 2015. – № 5-8.

4. Maschinenfabrik Köppern GmbH & Co. KG

5. Губин Г.В., Головань В.И., Губин Г.Г. Исследования режимов работы шаровых мельниц с высокой степенью заполнения // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2014. – Вип. 58(99)-59(100). – С. 34-40.

6. Электронный ресурс: <http://www.mining-media.ru/ru/article/drobilka/558-melnitsa-polycom-firmy-krupp-polysius-ag-revolyutsiya-v-oblasti-drobilnogo-oborudovaniya>.

7. Report on Laboratory and pilot plant testing on drill core sample from Iron Ore Project, Ukraine. Liebenburg-Othfresen, 2013, September 30<sup>th</sup>.

8. Болтенгаген И.Л., Власов В.Н., Клишин В.И. Расчет параметров валкового пресса для дробления кимберлитовой руды // Институт горного дела СОРАН.

9. Давид Макстон, Генеральный Управляющий (Западная Австралия) KHD Humboldt Wedag GmbH Франк ван дер Меер, Стефан Кёрш, (Германия) KHD Humboldt Wedag GmbH // Горная промышленность. – 2005. – №5.

10. Головань В.И., Губин Г.В. Короткая технологическая схема обогащения магнетитовых руд, обеспечивающая высокую энергоэффективность при производстве концентрата // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2014. – Вип. 58(99)-59(100). – С. 60-70.

© Головань В.И., Губин Г.Г., Скляр Л.В. 2015

*Надійшла до редколегії 19.07.2015 р.  
Рекомендовано до публікації д.т.н. Т.А. Олійник*