

УДК 622.732

Ю.А. МАЛИНОВСКИЙ, канд. техн., наук, доц., Национальная металлургическая академия Украины  
С.И. МАЛИНОВСКАЯ, канд. техн., наук, доц., ГВУЗ «Криворожский национальный университет»

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПОДГОТОВКИ РУДНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬНЫХ МАШИНАХ

Рассмотрены причины высокой энергоёмкости процессов рудоподготовки при обогащении рудного сырья. Показано, что значительного снижения процесса рудоподготовки можно добиться либо путем введения в схему дробления сырья дробилок сверхтонкого дробления или в результате интенсификации рабочего процесса в существующих дробилках мелкого дробления. Также в работе показано, что возможно повысить эффективность процесса измельчения в барабанных мельницах путем применения многостадийных схем измельчения с использованием в каждом барабане шаров одного типоразмера.

В современных условиях актуальной задачей является снижение высокой энергоёмкости при добыче полезных ископаемых и их переработке в процессе обогащения на горно-обогатительных комбинатах (ГОКах). При этом качество товарной железорудной продукции (концентрат, агломерат, окатыши) в Украине ниже, чем у производителей дальнего и ближнего зарубежья, а затраты на переработку сырья выше. Отметим, что энергопотребление для горно-металлургического комплекса Украины в 1,8-2 раза превышает энергопотребление зарубежных предприятий черной металлургии. В основном, это положение объясняется тем, что на предприятиях Украины используются несовершенные технологические схемы, которые обеспечиваются оборудованием, выбранным на начальном этапе разработки месторождений и освоения хвостового хозяйства. По мере углубления карьера и наращивания высоты бортов и дамб хвостохранилищ расходы на содержание этих подразделений ГОКов неуклонно растут. При этом режимы эксплуатации дробильно-размольного оборудования обогатительных фабрик не всегда обоснованы.

Горно-обогатительные предприятия потребляют от 15 до 20 % энергоресурсов горно-металлургического комплекса [1]. Циклы измельчения являются наиболее энергоёмкими операциями на обогатительных фабриках. При измельчении руды от крупности 1000-1500 мм до крупности 0,04-0,05 мм расход электроэнергии составляет 68-130 кВт·ч/т. Для конусных дробилок крупного дробления при степени дробления 6, расход электроэнергии колеблется от 0,1 до 0,8 кВт·ч/т. При этом коэффициент полезного действия дробилок среднего и мелкого дробления составляет от 0,4 до 0,65. Для конусных дробилок среднего и мелкого дробления, работающих при степени дробления 6, расход энергии составляет от 0,5 до 2,5 кВт·ч/т, при этом коэффициент полезного действия для крупногабаритных дробилок мелкого и среднего дробления составляет от 0,45 до 0,6. Из приведенных данных следует, что расход электроэнергии от 60 до 120 кВт·ч/т идет на доизмельчение руды в барабанных мельницах. Эти данные позволяют считать, что коэффициент полезного действия шаровой мельницы составляет величину  $< 0,001$ . Промышленные энергозатраты для конусных (и других типов) дробилок и барабанных мельниц позволяют сделать вывод, что измельчение руды до минимально возможной крупности должно производиться в дробилках (например, до крупности 3-5 мм), и только после максимального использования возможностей этого способа измельчения доизмельчать руду в барабанных мельницах.

Рассмотрим далее технологические схемы дробления и измельчения руды в условиях ГОКов. Процесс измельчения руды до указанной крупности (0,04-0,05 мм) ведется на конусных дробилках и барабанных мельницах. Во время проведения предварительной подготовки руды к обогащению на конусных дробилках обычно реализуется одна из трех технологических схем:

### **I - Четырехстадийное дробление:**

1. Крупное дробление в дробилках КСД позволяет обеспечить уменьшение размеров кусков руды от 1500 до 300 мм.
2. Крупное додрабывание руды в дробилках КРД позволяет получить уменьшение кусков руды от 300 до 100 мм.
3. Среднее дробление в дробилках КСД обеспечивает размеры кусков от 350-100 мм до 100-40 мм.
4. Мелкое дробление в дробилках КМД обеспечивает размеры кусков от 100-40 мм до 30-5 мм.

**II - Трехстадиальное дробление:**

1. Крупное дробление в дробилках ККД.
2. Среднее дробление в дробилках КСД.
3. Мелкое дробление в дробилках КМД.

**III - Двухстадиальное дробление:**

Крупное дробление в конусной или щековой дробилке для первичной подготовки руды (ККД и другие).

Крупное додрабывание в дробилках КРД.

Двухстадийное дробление используется в технологических схемах обогащения, в которых доводка руды по крупности ведется в барабанных мельницах самоизмельчения («сухого» или «мокрого»), обычно для «грубого» и «тонкого» помола.

При дроблении руды по любой из трех указанных схем проводится так называемая «сухая» подготовка.

Стадийное дробление материала проводится по следующим соображениям: размер наибольших кусков руды, поступающих на переработку, достигает 1000-1500 тмм, после дробления крупность руды должна составлять 30-5 мм. Обычно степень дробления в дробильной машине не превышает 6-10. Поэтому дробление исходной руды до требуемого размера осуществляется в нескольких последовательно работающих машинах, то есть в несколько стадий.

Несмотря на то, что процесс дробления является менее энергоемким, чем процесс измельчения (в мельницах), вместе с тем он также является весьма дорогостоящим, поэтому при дроблении нельзя передрабывать материал. Поэтому, перед каждой стадией дробления предусматривается выделение из поступающей руды мелкого класса, крупность которой соответствует крупности дробленой руды данной стадии. Выделение мелочи осуществляется на грохотах. Операции грохочения в схемах дробления позволяют за счет отсева мелочи сократить нагрузку на дробилки, повысить их производительность и сократить удельные затраты на электроэнергию при подготовке руды к обогащению. В зависимости от сочетания операций дробления и грохочения стадия дробления может осуществляться в открытом и замкнутом циклах.

При дроблении в открытом цикле каждый кусок руды, поступающий на дробление, проходит через дробилку в данной стадии только один раз. При дроблении в замкнутом цикле наиболее труднодробимые крупные куски руды выделяются из дробленого продукта на грохоте контрольного грохочения и возвращается на додрабывание в ту же самую дробилку.

В зависимости от наличия операций грохочения различают четыре разновидности схем одной стадии дробления (рис. 1), однако практически применяются следующие схемы дробления б,г.

В случае предъявления дополнительных требований к промпродукту по крупности используют схему а.

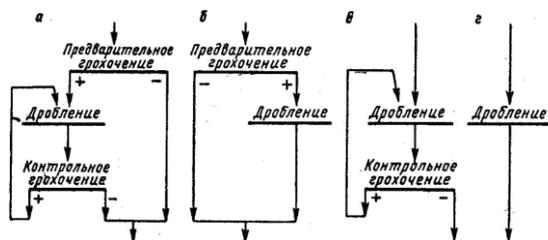


Рис. 1. Схемы дробления

При осуществлении процесса дробления железной руды по четырехстадиальной схеме (схема I) можно получить примерный гранулометрический состав продуктов дробления (используя на конечной стадии дробилку КМДТ 2200 с разгрузочной щелью РЩ=7,2 мм): +25-8,9 %; +20-13,8 %; +12- 31,1%; +5 % - 31,9 %; - 5 -14,3 % [4].

После мелкого дробления (или крупного, в зависимости от общей технологической схемы рудоподготовки), руда подвергается дальнейшей переработке в барабанных мельницах. В зависимости от принятой технологии измельчение может выполняться в «мокрой» или «сухой» средах. Если используется «мокрое» измельчение, то классификация промпродукта выполняется в спиральных классификаторах или гидроциклонах. Если используется «сухое» измельчение, то классификация выполняется в воздушных классификаторах или сепараторах.

В рамках данной работы преимущественно рассмотрим «мокрое» измельчение.

По числу приемов измельчения различают схемы одностадиальные, двухстадиальные и трехстадиальные (применяются редко). При стадийном измельчении могут применяться следующие виды классификации материала: предварительная (перед мельницей): поверочная, замыкающая цикл; контрольная после поверочной.

При предварительной классификации удаляется часть исходного материала, по своей крупности соответствующего крупности продукта измельчения в данной стадии (по принципу «не дробить ничего лишнего»).

При поверочной классификации из измельченного в мельнице материала выделяется продукт назначенной крупности, а крупный продукт возвращается в ту же мельницу. В некоторых случаях предварительная и поверочная классификации совмещаются.

В контрольную классификацию поступает слив поверочной классификации. Контрольную классификацию применяют в тех случаях, если необходимо получить продукт более тонкий, чем продукт, выдаваемый после поверочной классификации.

**Одностадийные схемы измельчения** применяются при относительно крупном конечном продукте измельчения  $<0,2$  мм.

При более тонком  $<0,15$  мм измельчении материала более экономно двухстадийное измельчение. Одностадийные схемы измельчения изображены на рис. 2.

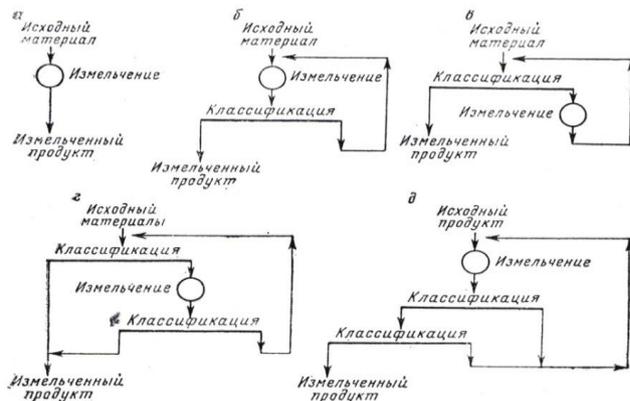


Рис. 2. Одностадийные схемы измельчения

В схеме *a* мельница работает в открытом цикле, разгрузка является готовым продуктом. Схема применяется при грубом измельчении (до 1-5 мм) в стержневых мельницах на фабриках гравитационного обогащения. Мельницы в открытом цикле ставятся также для первой стадии измельчения в двухстадийных схемах. В схеме *б* (замкнутый цикл поверочной классификации), исходный материал загружается в мельницу. Схема наиболее распространена. Применяется при крупности исходного материала от 10 до 50 мм. В силу того, что на входе в барабанную мельницу нас интересует лишь дробленый материал крупностью 5-6 мм, то необходимо

обратить внимание на схемы, предназначенные к работе на мелком исходном материале. К таким относятся схемы *в* и *г*. В схеме *в* исходный материал загружается в классификацию, замыкающую цикл измельчения, то есть предварительная и поверочная классификации совмещены. Схема применяется при мелком исходном материале (мельче 10 мм), содержащем более 15% готового продукта, а также во второй стадии двухстадийных схем. Схема *г* отличается от схемы *в*, тем, что исходный материал помещается в отдельную классификацию. По схеме *г* исходный материал загружается в мельницу. Эта схема будет более энергоемкой.

Для реализации схем *б, в, г, д* мельницы должны работать в замкнутом цикле, например, со спиральным классификатором или гидроциклоном [1] для измельчения по «мокрому» способу или в воздушных классификаторах или сепараторах при измельчении по «сухому» способу. Одностадийные схемы *в* и *г* (рис. 2) непосредственно могут быть применены на обогатительных фабриках для тонкого измельчения материал, если использовать двухкамерные мельницы аналогичные усиленным мельницам МЦ 4,0×13,5 (для «сухого» измельчения непосредственно, а для «мокрого» - при незначительном изменении конструкции). При таком подходе имеется возможность экономии на общеэксплуатационных расходах по обслуживанию мельниц, а также за счет использования более рациональных схем рудоподготовки на энергопотреблении дробильно-измельчительного цикла.

**Двухстадийные схемы измельчения.** При двухстадийном измельчении (рис. 3) мельницы устанавливают последовательно - одна мельница в I стадии для более крупного измельчения в материале и одна или несколько мельниц во II стадии для измельчения крупного продукта I стадии до кондиционной крупности. Мельницы I стадии могут работать в открытом, а также в замкнутом или частично замкнутом циклах, а мельницы II стадии - обязательно в замкнутом цикле. Двухстадийные схемы различают по способу передачи нагрузки из I-ой стадии во II стадию: через пески или через слив.

Если нагрузка передается через пески, то мельница I-й стадии работает в открытом или частично замкнутом цикле, а мельницы II-й стадии - обязательно в замкнутом цикле.

При подаче нагрузки через слив, мельницы I стадии работают так же, как и мельницы II

стадии, в полностью замкнутом цикле.

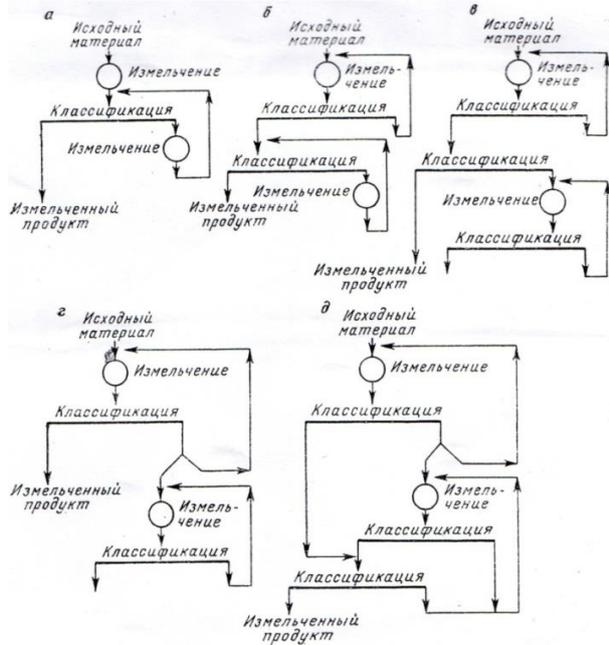


Рис.3. Двухстадиальные схемы измельчения

Обратимся к рис. 3. Здесь в схеме б - мельница I стадии работает в замкнутом цикле, предварительная и поверочная классификация совмещены. Схема применяется наиболее часто, в ней можно получить конечный продукт любой крупности. Схема в - аналогична схеме б, здесь предварительная и поверочная классификация производятся отдельно. Схемы г и д используются при измельчении руд, содержащих тяжелые легкоизмельчаемые материалы. В схемах г и д - одна часть песков первой классификации направляется в первую мельницу, а вторая часть - во вторую мельницу. По этим схемам г и д - первая мельница может работать в открытом цикле.

Двухстадиальные или одностадиальные схемы с двухкамерными мельницами могут обеспечить любую требуемую тонкость измельчения, вплоть до 95% класса -0,50 мм.

Под оптимизацией процесса переработки руды при ее подготовке к обогащению понимается повышение эффективности работы всей технологической линии на участках дробления и измельчения. С точки зрения оптимизации энергозатрат участка дробления и измельчения сравним коэффициенты полезного действия используемого оборудования. Так, коэффициент полезного действия конусных дробилок для крупного и среднего дробления колеблется от 0,4 до 0,65, а для особотонкого составляет 0,2-0,4. Вместе с тем, коэффициент полезного действия, как шаровых мельниц, так и мельниц самоизмельчения составляет величину <0,001 [3]. Таким образом, энергетические затраты при измельчении материалов в барабанных мельницах по меньшей мере в 200 раз больше, чем при мелком дроблении. Из таких соображений следует, что для оптимизации затрат, горную массу целесообразно дробить до минимальной крупности, которую может позволить дробилка (ориентировочно 5-6 мм). Это достигается либо путем интенсификации в физических полях процесса дробления для существующих конусных дробилок, либо путем установки дополнительных дробилок сверхтонкого дробления после дробилок мелкого дробления для доизмельчения руды крупностью 20-25 мм до крупности 5 мм, работающих в замкнутом цикле с грохотом (например, дробилка «Жиродиск» 84 GD {2100 мм} фирмы «Рехгсворд» производительностью 130 т/час при крупности готового продукта 5 мм) [6].

Количество дробилок сверхтонкого дробления связано с производительностью существующего участка мелкого дробления и выбирается кратным производительности этого участка.

Введение дополнительной стадии дробления окупается повышением производительности барабанных мельниц при подаче в них мелкого материала. Производительность мельниц повышается на 15-20 % при снижении крупности питания +20 мм с 15% до 2%. При этом должен быть отрегулирован размер мелющих шаров (более точно, размер мелющих тел) в соответствии с формулой К.А. Разумова [7]

$$d_M = \sqrt[3]{d_H} \tag{1}$$

где  $d_H$  - размер кусков исходного сырья.

Мелющие тела подбираются таким образом, чтобы их кинетическая энергия в момент удара была больше или равнялась энергии в начале разрушения кусков материала

$$E_T \geq E_0, \tag{2}$$

где  $E_0$  - энергия начала разрушения наибольших кусков материала загружаемого в мельницу;  $E_T$  - кинетическая энергия дробящего тела в момент удара.

Мелющие тела должны быть оптимально подобраны, как по размеру (чтобы энергии шара было достаточно для разрушения куска руды), так и по их количеству, чтобы в процессе из-

мельчения одновременно участвовало максимальное количество мелющих тел. Таким образом, в одном барабане должно находиться наибольшее число шаров кинетической энергии которых достаточно для разрушения наименьших кусков руды (5-6 мм), производимых дробилкой сверхтонкого дробления.

В рамках данной работы не получил детального рассмотрения процесс самоизмельчения. Этому процессу предшествует одна или две стадии крупного дробления, после чего дробленый продукт крупностью 100-350 мм, минуя дробилки среднего и мелкого дробления, направляется на дальнейшую переработку в мельницу бесшарового самоизмельчения (I стадия) и после классификации направляется в мельницу рудогалечного самоизмельчения (II стадия) для дальнейшей переработки и последующей классификации.

При такой схеме рудоподготовки наряду с исключением дробящих шаров наблюдается увеличение расходов на замену изношенных футеровок и увеличение расхода на электроэнергию, потребляемой на измельчение в 1,3-1,4 раза больше по сравнению с работой по традиционным схемам подготовки руды (с шарами). Кроме того, у мельниц самоизмельчения наблюдается снижение удельной производительности по сравнению с шаровыми и стержневыми мельницами.

Вместе с тем, все существующие типы мельниц: шаровые, стержневые и мельницы самоизмельчения могут быть использованы в предлагаемой цепи подготовки исходного сырья. После подготовки руды в дробилках по I (четырёхстадиальной схеме) с грохочением и без него (рис.1, сх. б и г выполняется сверхтонкое дробление по сх. а (рис.1). Дробленая руда подается в двухкамерную мельницу по сх. в или сх. з. Если измельчение руды ведется в обычных барабанных мельницах, то процесс измельчения ведется в две стадии (рис. 3, сх. б и сх. в, причем на I стадии может быть использована шаровая мельница с крупными шарами (или стержневая мельница), а на II стадии - шаровая мельница с мелкими шарами. Также можно использовать на I и II стадиях разные рудогалечные мельницы с «крупной» и «мелкой» «галькой». Причем, для приготовления рудной гальки должна быть использована первичная мельница бесшарового измельчения (первичная мельница), которая будет производить рудную гальку для 3-4 рудогалечных машин.

Проведенные исследования позволяют сделать **следующие выводы:**

1. Технологические схемы дробления рудного материала должны быть дополнены конусными дробилками сверхтонкого дробления с конечным продуктом крупностью 5-6 мм, или в существующих схемах использовать интенсификацию процесса мелкого дробления в физических полях для получения конечного продукта той же крупности.
2. Барабанные мельницы предназначены для тонкого измельчения материалов, поэтому их нерационально использовать для переработки сырья крупностью более 5-6 мм.
3. Тонкое измельчение руд целесообразно вести в несколько стадий, используя для каждой стадии дробящие тела одного размера, которые согласованы с крупностью исходного сырья каждой стадии. Перспективным вместо стадийного измельчения является вариант применения многокамерных мельниц.

#### *Список литературы*

1. Пальчевський Б.О. Дослідження технологічних систем / **Б.О. Пальчевський**. // Львів, «Світ», 2001, 232 с.
2. Андреев С.Е., Перов В.А., Зверевич В.В. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых / **С.Е. Андреев, В.А. Перов, В.В. Зверевич** // М.: Недра, 1980 – 415 с.
3. Муйземнек Ю.А., Калюнов Г.А., Кочетов Е.В. и др. Конусные дробилки / **Ю.А.Муйземнек, Г.А. Калюнов, Е.В. Кочетов** // М., «Машиностроение», 1970, 231 с.
4. Кармазин В.И., Денисенко А.И., Серго Е.Е. «Недра», 1918. - 184с.
5. Сиденко П.М. Измельчение в химической промышленности. М. «Химия», 1977. - 368 с.
6. Клушанцев Б.В. Косарев А.И. Муйземнек Ю.А. Дробилки. Конструкция, расчет, особенности эксплуатации / **Б.В. Клушанцев, А.И. Косарев, Ю.А. Муйземнек** // М.: «Машиностроение». 198. 320 с.
7. Олевский В.А. Размольное оборудование обогатительных фабрик / **В.А.Олевский** // М.: Госгортехиздат, 1963. - 448 с.

Рукопис подано до редакції 16.04.12