

Продукт	Выход, %	Содержание железа, %	Извлечение железа, %	Производительность, т/ч
				сухая масса
Концентрат	48,62	65,1	92,63	170,98
Хвосты	61,99	15,59	26,31	218,02

Таблица 4

Технологические показатели обогащения магнетитовых кварцитов с применением тонкого грохочения в замкнутом цикле

Продукт	Выход, %	Содержание железа, %	Извлечение железа, %	Производительность, т/ч
				сухая масса
Исходная руда	100,0	33,93	100,0	401,4
Концентрат	35,32	68,0	70,79	141,78
Хвосты	64,68	15,32	29,21	259,62

**Выводы.** Инвестиционные и эксплуатационные затраты при тонком грохочении значительно ниже, чем при достижении тех же технологических параметров дальнейшим измельчением либо пенной флотацией. Это подтверждает опыт эксплуатации высокочастотного грохота разработки корпорации Derrick на дробильно-обогажительных фабриках ОАО «Ковдорский ГОК», ОАО «Карельский Окамыш», ОАО «Соколовско-Сарбайское горно-обогажительное производственное объединение» и других.

При полном внедрении тонкого грохочения на грохотах разработки корпорации Derrick на фабрике №2 ГОКа ОАО «АрселорМиттал Кривой Рог» возможен выпуск высококачественного концентрата с содержанием железа в нем 68 %.

#### Список литературы

1. Анализ работы зарубежных обогажительных и окомковательных фабрик для обработки магнетитовых руд // **Т.Т. Бердышева, Н.И. Мещерякова, Л.А. Рейгаровская, Н.С. Ревзина** - М.: ЦНИИТЭП ЧМ, 1982 (обзорная информация. Черная металлургия), -95с.
2. **Першуков А.А., Першуков А.А.** Горнорудная промышленность - пути и методы реализации программы энергосбережения. М.: Центр физико-технических исследований и новых технологий (ЦФТИ и ТП), 1996, -117с
3. **Пелевин А.Е., Лазебная М.В.** Применение грохотов «Деррик» в замкнутом цикле измельчения на обогажительной фабрике ОАО «Комбинат КМАруда» // Обогащение руд. - 2009. -№2. - С.4-8.
4. **Дж. Веннер, Н.Тране, В.Ю. Лемс.** Опыт применения вибрационных грохотов корпорации «DERRICK» при обогащении железных руд. // Горный журнал. - 2002. - №3. - С. 60-64.
5. Освоение высокочастотного грохота корпорации «DERRICK» на «ССГПО» // **М.М. Турдахунов, О.С. Исаченко, В.А. Барсов и др.** / Горная промышленность. - 2002.-№2.-С.29-30.
6. Промышленные испытания тонкого грохочения концентрата на Днепровском горнообогажительном комбинате. // **С.Г. Евсевич, Б.В. Кизевальтер, Л.А.Дмитриев и др.** Обогащение руд.-Л., 1975 . С.23-28.

Рукопись поступила в редакцию 22.03.13

УДК 622. 23:05459

Т.А. ОЛЕЙНИК, д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «Криворожский национальный университет»  
И.В. ХМЕЛЬ, главный обоганитель, ПАО «Северный горнообогажительный комбинат»

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЗИНОВЫХ ФУТЕРОВОЧНЫХ ПЛИТ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ РУДЫ СЕВЕРНОГО ГОКА

Приведены данные использования резиновой футеровки в мельницах Северного горнообогажительного комбината. Показано распределение энергозатрат при использовании резиновой футеровки в мельницах. Доказано, что при использовании резиновой футеровки прирост готового класса увеличился на 17-29 %; снизился расход мелющих тел на 10% и расход электроэнергии на 10-12%

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** Для горно-обогажительных комбинатов при современном ухудшении условий разработки месторождений полезных ископаемых, необходимости вовлечения в переработку руд с пониженным содержанием полезного компонента и, следовательно, увеличения объемов переработки исходного продукта, весьма важным является повышение производительности отделений рудоподготовки и, прежде всего, отделений измельчения.

Часть энергии, потребляемой шаровыми мельницами, расходуется на образование новой поверхности, причем характер взаимодействия измельчаемого материала с мелющей средой

позволяет сделать вывод о том, что в процессе измельчения имеют место все виды процессов разрушения: раздавливание, раскалывание, излом, истирание. Значительная часть потребляемой энергии расходуется на износ футеровки и мелющих тел, а также превращается в тепло, выделяемое в процессе износа и измельчения. Поэтому в себестоимости железорудного концентрата энергозатраты на измельчение руды в мельницах составляют более 50 %. Перераспределение потребляемой энергии в пользу энергии, расходуемой на образование новой поверхности, позволит сократить удельные энергетические затраты. Оценка влияния профиля футеровочных плит на сокращение энергозатрат и увеличения новой поверхности за счет повышения производительности мельницы по готовому классу является актуальной научно-практической задачей.

**Анализ исследований и публикаций.** Для защиты внутренней поверхности барабана шаровых мельниц от износа и интенсификации процесса измельчения внутренняя поверхность барабана и торцовые стенки футеруются броневыми плитами. От геометрического профиля футеровок существенно зависит их износ, интенсивность измельчения исходного сырья, удельный расход электроэнергии и измельчающих тел [1-4 и др.]. Вопросам усовершенствования конструкции броневых плит посвящено большое количество работ [1-4 и др.], где рассматриваются причины износа футеровок и мероприятия по его снижению.

В настоящее время на горнообогатительных комбинатах по переработке железных руд в мельницах первой стадии измельчения, работающих на относительно крупной руде и шарах больших размеров, применяются в качестве футеровки цилиндрической части барабана броневые плиты с разнообразными профилями поперечного сечения (волновой, Крюкова, каскадный, балочный, ребристый, норильский, ступенчатый и другие), которые изготовлены из высокомарганцовистых сталей типа 110Г13Л [1-4], а также белых чугунов типа ИЧ210Х12Г5 (ВУ-4) и ИЧ210Х30Г3 (ВУ-10) [1]. Это ведет к увеличению номенклатуры выпускаемых литейными цехами деталей и затруднению унификации ремонтных комплектов. На мельницах второй и последующих стадий успешно применяется резиновая футеровка. Опыт эксплуатации мельниц второй и последующих стадий измельчения [2,3,4 и др.] показал, что срок службы резиновых футеровок в 2-2,5 раза выше, чем изготовленных из марганцовистых сталей. Кроме этого с внедрением резиновой футеровки снизился до санитарных норм шум, а вес комплекта футеровки уменьшился минимум на 85%. Отмечается повышение производительности мельниц, оборудованных резиновой футеровкой, которое в отдельных случаях можно объяснить увеличением полезного объема мельницы.

В процессе эксплуатации мельниц геометрические параметры резиновой футеровки не остаются постоянными, прежде всего, вследствие абразивно-усталостного износа. Изменение параметров носит случайный характер и непосредственно связано с детерминированным многомерным хаосом и характеризуется сложным пространственно-временным поведением. Тем не менее, при разрушении футеровки (в основном её износе; вырывы, сколы материала, глубокие трещины можно рассматривать как случайные повреждения) наблюдается определённая закономерность, свидетельствующая о существовании некоторой формообразующей тенденции, характеризующейся определённой универсальной постоянной. Об этом свидетельствует и волновая форма износа элементов футеровки, и речной узор и т.д. Разрушение как нелинейный вероятностный процесс создаёт множество форм изношенности плит и лифтов футеровки, что не позволяет использовать для их описания одну математическую функцию. С некоторым приближением геометрическая форма поверхности износа плит резиновой футеровки плитоплита может быть описана логарифмической функцией вида  $y = b \exp[-(ax)^2]$  или, как частный случай, уравнением логарифмической спирали или уравнением алгебраической кривой типа локон Аньези [2,3].

В инженерной практике наиболее характерным и универсальным информационным параметром, определяющим сопротивляемость руды измельчению, является эффективность измельчения, которая определяется как количество энергии, израсходованной на одну тонну кондиционного продукта (например, концентрата)

$$e_{эф} = \frac{U_3}{Q(\beta_n - \beta_{исх})}, \quad (1)$$

где  $U_3$  - количество энергии, израсходованной в единицу времени, кВт·ч;  $Q$  - количество руды, измельчённой за промежуток времени, т;  $\beta_n$ ,  $\beta_{исх}$  - содержание заданного класса крупности со-

ответственно в измельченном продукте и в исходной руде, %.

В случае постоянного состава перерабатываемой руды минимальное значение  $e_{эф}$  будет свидетельствовать о работе мельницы в оптимальном режиме по параметрам загрузки и производительности.

Применительно к квазихрупкому разрушению горных пород при измельчении поверхностная энергия может рассматриваться как энергия взаимодействия частиц. Если разрушение породы произошло по некоторой поверхности, на единицу которой приходилось  $n_0$  разорванных связей с одинаковой энергией взаимодействия  $u_0$ , то поверхностная энергия на единицу площади  $U$  будет равна

$$U = \frac{u_0 m_0 n_0}{\rho_0 n} \quad (2)$$

где  $u_0$  - энергия взаимодействия частиц;  $m_0$  - масса одной частицы;  $n_0$  - число разорванных связей на единицу поверхности;  $\rho_0$  - плотность породы при некоторой температуре;  $n$  - число частиц.

Из формулы (2) следует, что поверхностная энергия пропорциональна энергии взаимодействия частиц.

Известно, что энергоёмкость разрушения горных пород прямо пропорциональна квадрату прочности и обратно пропорциональна модулю упругости. Известно также, что предел прочности породы на сжатие примерно в 7-10 раз больше предела прочности на сдвиг.

В принципе, полную энергию разрушения  $\Sigma U$  горной породы можно выразить следующим уравнением

$$\Sigma U = U_1 + U_2 + U_3, \quad (3)$$

где  $U_1$  - энергия разрушения непосредственно образца породы;  $U_2$  - энергия, связанная с конструктивными особенностями разрушающего механизма;  $U_3$  - энергия, связанная со свойствами и структурой горной породы.

**Постановка задачи.** Если рассматривать физическую сущность процесса разрушения, то в технологии измельчения необходимо соблюдать следующий принцип: разрушение горной породы должно осуществляться за счёт создания преимущественно сдвиговых напряжений.

Реализовать такие сдвиговые напряжения можно в основном за счет конструкции футеровки, за счет ее морфометрических параметров и рациональной укладки элементов в барабане мельницы. Важную роль играет также материал футеровки, который должен обладать высокой прочностью, износостойкостью и большой диссипацией энергии. Наиболее подходящим материалом является резина, в том числе и в сочетании с металлом.

**Изложение материала и результаты.** На ПАО «Северный ГОК» основные энергозатраты приходятся на процессы дробления и измельчения и достигают 100,61 кВт·ч/т концентрата (данные за 2012 г.), в том числе по переделу измельчения - 51,88 кВт·ч/т концентрата.

Рассмотрим энергетическую составляющую процессов дробления и измельчения горных пород.

Согласно теории Кулона-Навье разрушение образца горной породы произойдет в том случае, когда касательное напряжение, действующее в плоскости разрушения, достигнет величины

$$|\tau_\theta| = S_0 + \mu \sigma_\theta, \quad (4)$$

или

$$S_0 = |\tau_\theta| - \mu \sigma_\theta, \quad (5)$$

где  $|\tau_\theta|$  - абсолютное значение касательного напряжения;  $\mu \sigma_\theta$  - выражение, тождественное силе трения на наклонной плоскости с углом  $\theta$ ;  $S_0$  - прочность материала при сдвиге;  $\mu$  - коэффициент внутреннего трения;  $\sigma_\theta$  - нормальное напряжение на наклонной плоскости с углом  $\theta$ .

В терминах нормального и касательного напряжений критерий прочности Кулона-Навье может быть записан в виде

$$\sigma_\theta = \frac{(\sigma_1 + \sigma_3) 2 \cos 2\theta}{2 + (\sigma_1 - \sigma_3)}, \quad (6)$$

$$\tau_\theta = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \sin 2\theta. \quad (7)$$

Отсюда

$$S_0 = |\tau_\theta| - \mu\sigma_\theta = \frac{\rho}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)(\sin 2\theta - \mu \cos 2\theta). \quad (8)$$

При одноосном сжатии ( $\sigma_1 = C_0$ ,  $\sigma_3 = 0$ ) критерий Кулона-Навье можно записать следующим образом

$$C_0 = 2S_0/(\mu^2 + 1)^{0,5} - \mu \quad (9)$$

или

$$S_0 = \frac{1}{2}C_0[(\mu^2 + 1)^{0,5} - \mu], \quad (10)$$

где  $C_0$  - прочность материала при сжатии.

Сравнивая выражения (8) и (9) можно отметить, что при  $\mu = 1$  (номинальное значение коэффициента внутреннего трения) прочность горной породы на сжатие всегда больше прочности при сдвиге, т.е.  $C_0 > S_0$ . Это один из весьма важных выводов теории прочности Кулона-Навье, который подтверждается экспериментально. Для горных пород при различных видах нагружения экспериментально доказано, что

$$\sigma_p < \tau_\theta < \sigma_{сж}.$$

При этом прочность горной породы на сжатие в 5-10 раз выше предела прочности на сдвиг и в 8-15 раз выше предела прочности на растяжение.

Такая же закономерность наблюдается и при рассмотрении энергоёмкости разрушения горной породы: при разрушении породы сжатием энергоёмкость в 10-20 раз (по мнению авторов работы [5] - в 40-90 раз!) больше, чем при разрушении сдвиговыми или растягивающими напряжениями.

Рассмотрим пример определения энергоёмкости при разрушении железной руды со следующими механическими характеристиками, полученными при экспериментальных исследованиях стандартных образцов магнетитовых руд на СевГОКе:

модуль Юнга  $E = 5,2 \cdot 10^5$  кгс/см<sup>2</sup>,  
 модуль сдвига  $G = 2,2 \cdot 10^5$  кгс/см<sup>2</sup>,  
 прочность при сжатии  $\sigma_{сж} = 398$  кгс/см<sup>2</sup>,  
 прочность при сдвиге  $\sigma_{сд} = 62$  кгс/см<sup>2</sup>.

Тогда:

$$\frac{\sigma_{сж}}{\sigma_{сд}} = \frac{398}{62} = 6,4; \quad U_{сж} = \frac{\sigma_{сж}^2}{2E} = \frac{398^2}{2 \cdot 5,2 \cdot 10^5} = 0,152;$$

$$U_{сд} = \frac{\sigma_{сд}^2}{2G} = \frac{62^2}{2 \cdot 2,2 \cdot 10^5} = 0,00874; \quad \frac{U_{сж}}{U_{сд}} = \frac{0,152}{0,00874} = 17,4.$$

Как видно, энергоёмкость при разрушении образцов железной руды при деформациях сжатия в 17,4 раза больше, чем при разрушении сдвиговыми напряжениями.

Следовательно, наиболее энергосберегающим механизмом разрушения железных руд являются способы и средства, в которых реализуются преимущественно сдвиговые напряжения (растягивающие напряжения трудно реализовать).

Для подтверждения приведенных расчетов приведем результаты сравнительных испытаний мельниц МШЦ 3,6×5,5 второй и третьей стадии измельчения технологических секций РОФ-1 ПАО «СевГОК» с различными типами футеровок: металлической шарошипового профиля и резиновых «Плита – Волна» и «Плита – Лифтер» производства ООО «Валса-ГТВ» (испытания 2009-2012 гг.) (табл.1).

Таблица 1

Результаты исследования влияния резиновых футеровочных плит на эффективность измельчения руды ПАО «Северный ГОК»

Технологические показатели	Стадия измельчения	Металлическая футеровка шарошипового профиля	Резиновая футеровка «Плита-Волна»	Резиновая футеровка «Плита-лифтер»
Прирост готового класса (-0,056 мм), %	2	23,8-24,5	28,7-28,9	28,7-28,9
	3	10,7-11,8	17,20	10,7-11,8
Удельный расход электроэнергии, кВт/т руды	2	5,727	5,349	5,50
	3	6,370	5,890	5,92

Как видно из данных таблицы, удельный расход электроэнергии на мельницах с резиновой футеровкой («Плита-Волна») за весь период испытаний по сравнению с металлической футеровкой ниже: во второй стадии измельчения на 7,1 %, в третьей стадии измельчения на 7,46 %.

Помимо этого, применение резиновых футеровок в технологических схемах рудоподготовки позволило: снизить удельный расход мелющих тел на 10 % и снизить удельный расход электроэнергии в целом на технологическую секцию на 10-12 %.

**Выводы и направление дальнейших исследований.** Таким образом, конструкции резиновых и резинометаллических футеровок (прежде всего, «Плита-Волна» и «Плита-лифтер» - обе производства ООО «ВАЛСА-ГТВ») благодаря своим морфометрическим параметрам позволили сократить энергозатраты при измельчении руд в шаровых мельницах.

На СевГОКе на второй и третьей стадии измельчения достигнуты следующие положительные результаты: прирост готового класса увеличился на 17-29 %; расход мелющих тел снизился на 10 %; удельный расход электроэнергии в целом на технологическую секцию снизился на 10-12 %.

#### *Список литературы*

1. **Маляров П.В.** Основы интенсификации процессов рудоподготовки. Ростов-на-Дону, 2004.
2. **Дырда В.И., Евенко С.Л., Маркелов А.Е., Хмель И.В.** Рудоизмельчительные барабанные мельницы с резиновой футеровкой // Геотехническая механика. Межвед. сб. научн. тр. – Днепропетровск, 2011. - Выпуск 96. – С.1-34.
3. **Дырда В.И., Калашников В.А., Стойко А., Хмель И.В.** Динамическая модель волнового абразивно-усталостного разрушения резиновой футеровки в барабанных мельницах // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. – Днепропетровск. - 2012. – Вып. 106.
4. **Олейник Т.А., Хмель И.В.** Особенности процессов рудоподготовки при использовании мельниц с резиновой футеровкой// Вісник Криворізького технічного університету, 2011. - Вип.30. - С. 181-186
5. **Миндели Э.О.** Разрушение горных пород. – М.: Недра, 1975. – 600 с.

Рукопись поступила в редакцию 22.03.13

УДК 622.778.3: 622.341.12

Т.А. ОЛІЙНИК, д-р техн. наук, проф., К.А. ЛЕВЧЕНКО, канд. техн. наук,  
О.А. ГУЗЕМА, магістр, ДВНЗ «Криворізький національний університет»

### **ОСОБЛИВОСТІ ВИСОКОГРАДІЄНТНОЇ МАГНІТНОЇ СЕПАРАЦІЇ ОКИСЛЕНИХ ЗАЛІЗНИХ РУД КРИВБАСУ**

Надано результати збагачення окислених залізистих кварцитів. Приведено результати досліджень закономірностей зміни показників високоградієнтної магнітної сепарації при зміні технологічних параметрів сепаратора. Встановлено оптимальні значення технологічних параметрів, за яких значно підвищується якість концентрату.

**Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями.** Окислені залізисті кварцити Кривбасу, крім окремих покладів, як правило, є супутніми при видобутку магнетитових руд. Дотепер, як при підземному, так і при відкритому видобутку, окислені руди складаються у відвалах, що займають величезні території вільних орних земель. При цьому витрачено колосальні засоби на розробку й транспортування сотень мільйонів тон розкривних мас, де більшу половину і займають окислені залізисті кварцити. Так, на сьогоднішній день у відвалах гірничо-збагачувальних комбінатів заскладовано більше 1,3 млрд т окислених залізних руд. У зв'язку з цим не втрачає актуальності питання залучення в переробку попутно видобутих окислених залізистих кварцитів. У дев'яностих роках ХХ століття для Криворізького гірничо-збагачувального комбінату окислених руд була розроблена двохстадіальна технологія магнітного збагачення, для якої, в якості основного технологічного обладнання, передбачено встановлення високоградієнтного роторного сепаратора. Але ця технологія не дозволяє отримувати гематитові концентрати з масовою часткою заліза більше 60-61 %, в той час як, масова частка заліза у конкурентоспроможному гематитовому концентраті повинна бути на рівні 64-65%. У зв'язку розробка технологічних рішень, що дозволять підвищити якість гематитового концентрату від 61 до 64,7% є актуальним науково-практичним завданням.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Для вирішення поставленого завдання необхідно розгля-