

УДК 622.3:502.17; 622.73/.75

**Е.А. Ермолович, С.Б. Кетов**

## **ОПЫТ СВЕРХТОНКОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ОТХОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ ЖЕЛЕЗИСТЫХ КВАРЦИТОВ**

*Рассмотрены структурно-текстурные особенности отходов обогащения железистых кварцитов, их значительное отличие от природных железных руд. Обосновано применение технологии сверхтонкого измельчения для переработки отходов обогащения. Установлена принципиальная возможность сверхтонкого измельчения отходов обогащения железистых кварцитов посредством роторно-вихревой мельницы.*

*Ключевые слова: отходы обогащения, железистые кварциты, магнетит, кварц, сроки, вкрапленность, сверхтонкое измельчение, роторно-вихревая мельница.*

**П**роблема и ее связь с научными и практическими задачами. Идея переработки железорудных хвостов горно-обогатительных предприятий, с возможным получением из них железного концентрата и других полезных компонентов, в последнее время получает все большее распространение. Интерес к данному типу отходов вызван необходимостью решения целого комплекса проблем, которые, условно, можно разделить на технологические и экологические.

Технологические проблемы связаны с ухудшением геологических условий отработки месторождений железных руд, увеличением капитальных затрат на их освоение, снижением качества исходной руды, так как богатые месторождения практически отработаны и в переработку все больше вовлекаются труднообогатимые руды (железистые кварциты) с низким содержанием полезных компонентов.

Важнейшей экологической проблемой является большой объем отходов обогащения железной руды, под которые отчуждены значительные площади земель, в том числе сельско-

хозяйственного назначения. Кроме того, хвостохранилища — мощнейший источник загрязнения окружающей среды: почв, поверхностных и подземных вод, атмосферного воздуха.

Возможным решением вышеизложенных проблем является разработка технологии дообогащения железорудных хвостов, что, с одной стороны, позволит получать железорудный концентрат и тем самым создать источник минерального сырья для предприятий, где отработываемые запасы истощаются. С другой стороны, снижение концентрации железа в оставшейся части отходов позволит активнее вовлекать их в промышленное производство (например — производство стройматериалов), тем самым открывая путь к комплексной (безотходной) переработке техногенных отходов обогащения железных руд.

Однако, комплексная переработка отходов обогащения железистых кварцитов с получением концентрата, пригодного для металлургического передела и материалов с минимальным содержанием железа, невозможна без эффективного разделения рудной и нерудной составляющих

хвостов. Для решения данной задачи необходимо раскрытие сростков минералов в крупных и тонких фракциях отходов. Формирование данных фракций непосредственно связано со структурно-текстурными особенностями железистых кварцитов и технологическими схемами их обогащения. Ведущим фактором при обогащении руд выступает, прежде всего, крупность их измельчения [1], верхний предел которой в начале XX в. составлял 1 мм, в 30-е годы для всех типов руд он был снижен на порядок – до 100 мкм, а в настоящее время многие руды измельчаются до 50 мкм, т. к. существенно ухудшились их текстурно-структурные признаки.

**Анализ исследований и публикаций.** В железистых кварцитах преобладает слоистая текстура с выделением рудных, нерудных и смешанных слоев. Их мощность колеблется в широких пределах: от десятых долей до 20 мм [2].

Характерной структурной особенностью кварцитов является послынное изменение размеров вкрапленности рудных минералов. Размер зерен и агрегатов магнетита в рудных слоях во много раз превышает размер зерен его в нерудных слоях. Размер агрегатов магнетита в рудных слоях чаще всего составляет 0,07 – 0,3 мм, достигая 2 – 3 мм и более. Средние размеры индивидуализированных рудных зерен (полиэдров) в агрегатах изменяются от 0,05 до 0,1 мм в рудных слоях, в смешанных и нерудных 0,02 – 0,06 мм. Средний размер нерудных вкраплений, составляет 0,06 – 0,07 мм. Рудные слои содержат 70 – 80 % рудной фазы, нерудные порядка 10 – 30 %. При этом размеры нерудных агрегатов резко превышают размеры рудных вкраплений [2, 3].

Особенности строения железистых кварцитов определяют многостадийность технологических схем (дробление, измельчение, магнитное обогащение, а также обесшламливание тонкоизмельченных продуктов), позволяющих постепенно отделять нерудные минералы от магнетита. В зависимости от вкрапленности руды и требований к качеству концентрата число стадий обогащения достигает 3 – 4. В каждой стадии осуществляется вывод из процесса отвального по содержанию железа продукта. Оптимальной крупностью начала выделения хвостов на ГОКах Кривбасса и КМА является 40 – 60 % класса — 0,074 мм. Крупность конечного измельчения — 95 – 98 % класса — 0,074 (0,050) мм [3].

Наличие железосодержащих минералов в хвостах связано с двумя видами потерь, обусловленных несовершенством существующих технологических схем обогащения: потери при измельчении и потери при магнитной сепарации.

Первый вид потерь находится в непосредственной зависимости от изменения степени раскрытия рудной и нерудной фаз на различных стадиях измельчения железистых кварцитов. При грубом помоле (до — 3 мм) степень раскрытия рудной фазы отстает от раскрытия нерудной. На данном этапе, из-за меньшей твердости рудных минералов в сравнении с кварцем, который преобладает среди нерудных минералов, происходит скалывание мелких рудных частиц со сростков. При тонком измельчении, когда осуществляется раскрытие рудных сростков внутри крупных слоев, раскрытие рудной фазы опережает раскрытие нерудной [2]. В результате происходит переизмельчение раскры-

Таблица 1

**Диапазоны крупности частиц при механическом измельчении (дроблении, помоле и нанопомоле) [4,5]**

№	Способ измельчения и его стадия	Номинальная крупность питания $d_n$	Номинальная крупность продуктов измельчения $d_n$
<b>1.</b>	<b>Дробление</b>		<b>мм</b>
1.1.	крупное	1500 — 300	350 — 100
1.2.	среднее	350 — 100	100 — 40
1.3.	мелкое	100 — 40	50 — 5
<b>2.</b>	<b>Дезинтеграция (помол)</b>		<b>мкм</b>
2.1.	грубый	30 000 — 5 000	3000 — 500
2.2.	тонкий	1000 — 200	500 — 40
2.3.	сверхтонкий	1000 — 40	40 — 1
<b>3.</b>	<b>Нанопомол</b>		<b>мкм</b>
3.1.		>1	<1

тых рудных частиц, формирование тонкой фракции (менее 0,010 мм), которая не выделяется в концентрат на всех стадиях обогащения.

Потери при магнитной сепарации обуславливаются тем, что в процессе измельчения не достигается полное раскрытие рудной фазы и в хвостах теряются, в основном, бедные рудные сродки различной крупности.

В зависимости от разновидностей железных руд, их вещественного состава и текстурно-структурных особенностей, выделяемые в хвосты отходы обогащения разнятся между собой по гранулометрическому составу, содержанию железа и его распределению между фракциями. В то же время, общими для них являются: нарушенная текстура и измененная в процессе обогащения структура материала, низкое содержание и интенсивная вкрапленность рудных минералов, высокая степень измельчения, значительное количество прочных сродков, не раскрытых на всех стадиях дробления и измельчения.

Вышеперечисленные признаки, делают схожими отходы обогащения раз-

личных разновидностей железных руд и, в то же время, резко отличают их от природной руды, что является крайне важным в выборе схем переработки. Особое значение приобретает выбор типа измельчения, определяющего раскрытие рудных зерен в самых тонких сродках и всю технологию дальнейшего обогащения. Для достижения высокой степени раскрытия железосодержащих минералов в отходах обогащения необходимо сверхтонкое измельчение [4,5] (табл. 1) до частиц, по своим линейным размерам меньшим величины индивидуализированных рудных зерен, т.е. средний размер частиц измельченного материала ( $d_{cp}$ ) должен составлять не более 0,020 мм.

Шаровые и стержневые мельницы, используемые на большинстве горно-обогатительных предприятий для измельчения руды, из-за низкой энергонапряженности [6], т.е. мощности сообщаемой единице объема помольной камеры не позволяют экономичным способом получать материал указанной крупности.

Гораздо более эффективными являются мельницы рудного самоиз-

мельчения (Лебединский ГОК), которые, в зависимости от применяемого режима позволяют получить материал практически любой крупности. Кроме того, при самоизмельчении достигается максимальное раскрытие рудных минералов благодаря тому, что разрушение происходит не по случайным направлениям сжимающих усилий, а преимущественно по границам минеральных зерен в результате развития на их границах сдвиговых и растягивающих нагрузок. Данный способ измельчения железистых кварцитов, будучи наиболее совершенным из существующих, показал высокую эффективность при получении высококачественных железных концентратов, в том числе – суперконцентратов для бездомной металлургии. Однако измельчение отходов обогащения в мельницах рудного самоизмельчения не представляется возможным из-за отсутствия в хвостах крупных кусков породы, которые являются измельчающей средой для мелких частиц и исполняют роль мелких тел шаровых и стержневых мельниц [7,8].

Таким образом, для переработки отходов обогащения требуются иные технологии, чем для природных руд, другое оборудование, реализующее новые технические принципы и решения. Таковой, по нашему мнению, является технология сверхтонкого самоизмельчения материалов, посредством высокопроизводительных роторно-вихревых мельниц.

**Основная задача.** Целью работы, является исследование возможности сверхтонкого измельчения отходов обогащения железистых кварцитов, на роторно-вихревой мельнице и получение материала средней крупностью менее 0,020 мм.

**Изложение материала и результаты.** Принцип измельчения

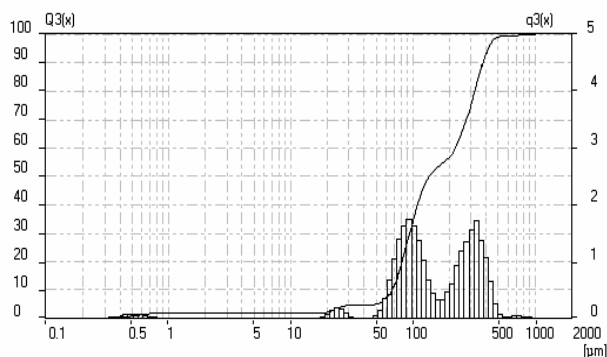
твердых частиц в вихревых потоках сводится к следующему. Увлекаясь вихрем, создаваемым рабочим органом (побудителем), отдельные частицы приобретают некоторую скорость движения, обусловленную их аэродинамическими свойствами и параметрами газового потока. Разница масс отдельных частиц смеси определяет различие траекторий движения, что в конечном итоге обеспечивает проскальзывание частиц относительно друг друга и их поверхностное взаимодействие. В результате изменения траекторий движения отдельные частицы сталкиваются. При определенных условиях они раскалываются, разрываются и частично истираются. В вихревом измельчителе обнаруживаются три вида нагружений (удар, сдвиг, сдвливание), воздействующих на каждую отдельную частицу. Этим обеспечивается высокая эффективность использования вихревого измельчителя.

Важными преимуществами роторно-вихревых мельниц являются.

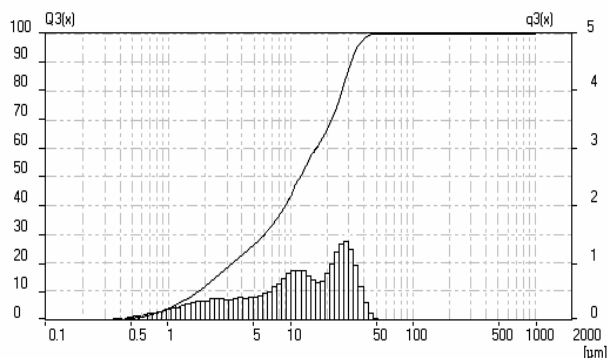
1. Высокая конечная степень измельчения (до 0,04 – 0,001 мм). Номинальная крупность получаемых продуктов зависит от настройки, комплектации установки, свойств исходных продуктов и длительности процесса измельчения.

2. Высокая производительность. Мельницы являются установками непрерывного действия. Их производительность определяется в первую очередь мощностью привода и зависит от технологической задачи, в том числе от требуемой крупности измельченного продукта, свойств исходного сырья и допустимых режимов его переработки.

3. Высокая энергонапряженность. Немаловажное значение имеет сухой способ измельчения, применяе-



**Рис. 1. Распределение по размерам частиц исходного материала**



**Рис. 2. Распределение по размерам частиц измельченного материала**

мый на роторно-вихревых мельницах, что позволяет использовать сухую магнитную сепарацию для разделения рудных и нерудных составляющих отходов.

Для проведения эксперимента использовались лежалые отходы обогащения с хвостохранилища ОАО «Комбинат КМАруда». Исходный образец представляет собой тонкозернистый материал серого цвета. В его составе преобладает двуокись кремния, около 68—70 % (твердость по шкале Мооса – 7) и окислы железа, до 20—25 % (твердость 5,5 – 6,5). Распределение частиц по размерам было

получено с помощью лазерного дифракционного анализатора размера частиц «Analysette 22 NanoTec». Установлено, что средний размер частиц составляет 192,7 мкм (рис. 1).

Измельчение проводилось на лабораторной роторно-вихревой мельнице «Торнадо» [9, 10] (потребляемая мощность 8 кВт, скорость вращения ротора двигателей до 4000 об/мин., скорость вращения побудителя до 10 000 об/мин., внутренний диаметр камеры измельчения 400 мм).

Режим измельчения, т.е. частота вращения побудителя, выбирался на основании величины скорости разрушения  $W_p$ , которая, согласно данным Кармазина [7], увеличивается с увеличением тонины вкрапленности и при сверхтонком измельчении составляет 200 м/с (для криворожских кварцитов).

Измельчение осуществлялось за один проход, частота вращения побудителя 100 Гц (линейная скорость ~ 200 м/с). Исходный продукт предварительно рассеивался на сите, номер сетки 05 (согласно ГОСТ 6613-86), для удаления посторонних предметов и крупнокусковой руды. В результате помола был получен материал, средний размер частиц которого составляет 14,79 мкм (рис. 2). Производительность мельницы при получении материала данной крупности составляет примерно 400 кг/час.

**Выводы и направление дальнейших исследований.** Сверхтон-

кое измельчение отходов обогащения железистых кварцитов, посредством высокопроизводительной роторно-вихревой мельницы, возможно. Получен материал, крупностью  $d_{ср} = 14,79$  мкм, что свидетельствует о максимальном раскрытии частиц железосодержащих минералов.

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку техноло-

гии грохочения и магнитной сепарации тонкодисперсных отходов обогащения железных руд.

Исследования выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования научным оборудованием БелГУ «Диагностика структуры и свойств наноматериалов» и научно-производственного предприятия «Нео-Тех».

---

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ревнивцев В.И. Рудоподготовка как новое направление горных наук. // Основные направления развития техники и технологии обогащения ПИ. — Л.: 1983. — С. 3—22.
2. Гершойг Ю. Г. Вещественный состав и оценка обогатимости бедных железных руд. — М.: Недра, 1968. — 200 с.
3. Изучение вещественного состава и обогатимости железных руд. / Ред. Григорьев В.Н. — М.: Недра, 1976. — 139 с.
4. Молчанов В.И., Юсупов Т.С. Физические и химические свойства тонкодиспергированных минералов. — М.: Недра, 1981. — 160 с.
5. Химическая энциклопедия: в 5 т.: т. 2: Даффа-Меди / Под ред. И.Л. Кнунянц. — М.: Сов. Энциклопедия, 1990. — 671 с.
6. Ходаков Г.С. Физика измельчения. — М.: Наука, 1972. — 308 с.
7. Кармазин В.И. Обогащение руд черных металлов. — М.: Недра, 1982. — 216 с.
8. Пивняк Г.Г., Вайсберг Л.А., Кириченко В.И., Пилов П.И., Кириченко В.В. Измельчение. Энергетика и технология. — М.: Издательский дом «Руда и Металлы», 2007. — 296 с.
9. Патент на изобретение «Измельчитель» № 2232050 от 10.07.2004 г.
10. Патент на полезную модель «Измельчитель» № 50872 от 27.01.2006 г. **ГИАБ**

---

#### КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Ермолович Елена Ахмедовна — кандидат технических наук, доцент, elena.ermolovich@mail.ru, Национальный исследовательский университет «БелГУ»,  
Кетов Сергей Борисович — заместитель директора, ketov@online.kharkiv.com, Научно-производственное предприятие «Нео-Тех».



---

#### ОТ РЕДАКЦИИ

В Горном информационно-аналитическом бюллетене № 5 2013 г. на страницах 101 и 413 допущена техническая ошибка в составе авторов. Следует читать:

В.П. Мязин, Д.М. Шестернев, А.Е. Баянов Техническое решение для реализации технологии круглогодичного кучного выщелачивания в условиях криолитозоны Забайкалья.

Статья повторно опубликована в ГИАБ № 6 2013 г. на страницах 99—106.

Приносим авторам свои извинения.