

УДК 622.775

**К.В. НИКОЛАЕНКО**, канд. техн. наук,

**П.К. НИКОЛАЕНКО**

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

### **ОСОБЕННОСТИ РУДОПОДГОТОВКИ НЕКОНДИЦИОННОГО КУСКОВОГО ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩЕГО ОТСЕВА ДРОБИЛЬНО-СОРТИРОВОЧНЫХ ФАБРИК ДЛЯ ЕГО ЭФФЕКТИВНОГО ОБОГАЩЕНИЯ**

*Постановка проблемы и ее связь с научными и практическими заданиями.* Одним из источников металлургического сырья являются богатые гематитовые руды. Крупные железорудные месторождения выявлены и эксплуатируются на всех континентах и в частности в Индии и Украине.

В процессе отработки богатых руд Индии на дробильно-сортировочных фабриках (ДСФ) путем дробления в щековых дробилках и грохочения накапливаются два вида железо-содержащих отходов: низкокondиционные (45-55% железа) и некондиционные (30-45% железа). Их общее количество только в границах разрабатываемых месторождений, по разным оценкам, составляет 3-5 млрд т. В настоящее время изучается возможность производства из этого исходного материала – кондиционного железорудного сырья с общим содержанием железа не ниже 60%.

К основным особенностям низко- и некондиционного железорудного сырья изученного района штата Орисса (Индия) относится неоднородность его минерального, химического состава, физических, технических свойств и, как следствие – его обогатимости. Основной задачей обогащения руд данного типа является, отделение агрегатов нерудных минералов (главным образом, кварца, каолинита и гидроксидов алюминия) от частиц рудных минералов – гематита (мартита и железной слюдки) и гетита. В этом состоит главная проблема разработки эффективной технологии производства из низкокondиционного исходного сырья высококачественного полезного конечного продукта. Основная причина – недостаточно эффективное раскрытие агрегатов рудных и нерудных минералов в процессе рудоподготовки в щековых дробилках, вследствие чего при обогащении в отходы поступает большое количество рудных частиц.

Богатые гематитовые железные руды также являются одним из видов минерального сырья Криворожского бассейна Украины.

Среди добываемых шахтами выделяются четыре их минеральные разновидности:

- 1) мартитовые, железнослюдко-мартитовые ("синьки") – среднее содержание железа около 62%;
- 2) дисперсногематит-мартитовые, дисперсногематит-железнослюдко-мартитовые ("краско-синьки") – около 59%;

3) мартит-дисперсногематитовые ("синько-краски") – около 54%;

4) дисперсногематитовые, каолинит-дисперсногематитовые ("краски") – около 50%. Среднее содержание железа в составе руд подготовленных к отработке залежей разных месторождений составляет от 55 до 58 %.

В связи со сложностью контактов рудных тел, несовершенством технологии добычи руды – в рудную массу в процессе ее добычи поступают нерудные компоненты: гематитовые кварциты (среднее содержание железа около 37%), безрудные (силикатные, каолинит-дисперсногематитовые, мономинеральные) кварциты (около 25%); разного состава сланцы (около 20%), а также в незначительном количестве горные породы, которыми сложены толщи, подстилающие железисто-кремнистую формацию – тальк-содержащие, кварц-мусковитовые сланцы, мусковитовые кварциты, амфиболиты, граниты и др. (около 15%). Содержание в добываемой рудной массе нерудных компонентов изменяется от 20 до 30%, в том числе гематитовых кварцитов 15-25%, других горных пород около 5%.

В процессе их отработки на ДСФ методом трехстадийного дробления в конусных дробилках и грохочения производится разделение менее прочных частиц богатых руд и более прочных, более устойчивых к механическим воздействиям частиц большинства маложелезистых горных пород. Полезным конечным продуктом обогащения является товарная агломерационная руда с общим содержанием железа 55-60% (крупностью 10-0 мм); отходом обогащения – крупнозернистый отсев ДСФ (крупностью от 10 до 100 мм) с общим содержанием железа от 38 до 45%, в среднем около 42%.

Вследствие недостаточной избирательности дробления и грохочения, в составе крупнозернистого отсева кроме низкожелезистых горных пород присутствуют также частицы богатых руд. Их количество в отсева ДСФ разных шахт колеблется, в зависимости от минералогических характеристик исходной руды, от 5 до 15% от общей массы отсева, иногда превышает 20%.

В складах шахт Криворожского бассейна накоплено, по разным оценкам, от 10 до 20 млн т этого вида сырья. Ежегодно этот показатель возрастает на 1-2 млн т.

В настоящее время, из всех предложенных технологий переработки кускового некондиционного гематитового сырья, в полном объеме была реализована только технология, основанная на додрабливании крупнозернистого отсева ДСФ в конусной или щековой дробилках, до крупности частиц менее 10 мм с последующим "сухим" магнитным обогащением в поле повышенной интенсивности. Однако работа обогатительных установок показала, что содержание железа в производимой агломерационной руде не превышает 52-53%. Основная причина – недостаточно эффективное раскрытие агрегатов рудных и нерудных минералов в дробильных аппаратах основным разрушающим действием которых является истирание руды, вследствие чего в полезный конечный продукт поступает большое количество рудно-нерудных сростков.

*Постановка задачи.* На сегодняшний день, главной задачей, при производстве вторичной аглоруды из отсевов ДСФ, является достижение гарантированных качественных показателей в конечном продукте на уровне требований ме-

## **Підготовчі процеси збагачення**

таллургов, для производства агломерата. Соответственно, содержание  $Fe_{\text{общ}}$  должно быть в пределах 56-61%. Достижение данных качественных показателей возможно только при предварительном, селективном разрушении компонентов руды перед обогащением и создании условий для эффективного "сухого" обогащения дробленной руды.

Одним из путей селективного разрушения, является разрушение за счет раздавливания кусков руды, осуществляемое в роллер-прессах или валковых дробилках и разрушение за счет кинетической энергии удара куска руды, осуществляемое в центробежной дробилке. При этом менее крепкие минералы интенсивно разрушаются и переходят в мелкие классы, а более крепкие разрушаются незначительно.

*Изложение материала и результаты.* Авторами было изучено влияние дробления низкокондиционного крупнокусового отсева ДСФ штата Орисса (Индия) в валковой дробилке и ДСФ шахты им. Фрунзе (Украина) в центробежной дробилке, на качественно-количественные показатели полученной товарной продукции.

Исследования по обогатимости низкокондиционного крупнокусового отсева ДСФ месторождения штата Орисса были проведены на материале крупностью 40-0 мм, с применением лабораторной валковой дробилки, стержневой мельницы и воздушного сепаратора.

Минералогический анализ исходного материала приведен в табл. 1 и показал следующее.

Таблица 1

Минеральный состав исходного материала	
Минералы	Содержание минералов, %
Гематит,	65,4
<i>в том числе:</i>	
мартит	44,3
железная слюдка	18,0
дисперсный гематит	5,1
Гидроксиды железа,	13,3
<i>в том числе:</i>	
гетит	8,8
лепидокрокит	1,6
дисперсный гетит	2,9
Минералы группы кремнезема,	3,8
<i>в том числе:</i>	
кварц	1,6
халцедон	1,7
опал	0,5
Силикаты,	13,0
<i>в том числе:</i>	
каолинит	11,3
гидрослюда	1,7
Недиагностированные минеральные фазы	0,5
Всего	100,0

Основними рудними мінералами вихідного сиров'язя є зерниста (мартит) і пластинчаста (железна слюдка) різновидності гематита. Вони характеризуються відносно високою щільністю ( $5200 \text{ кг/м}^3$ ) і підвищеною по порівнянню з іншими рудними мінералами удільної магнітної вразливістю.

Для гематита характерні більш низькі показники щільності ( $4500\text{-}5000 \text{ кг/м}^3$ ) і удільної магнітної вразливості.

Землисті агрегати дисперсного гематита і дисперсного гематита містять примісь каолініта, гідрослюди і інших тонкокристалічних силікатів. Ці агрегати характеризуються низькою механічною міцністю, схильністю до переходу в пилевидний стан при дробленні і змельченні.

Кварц є більш рідким по порівнянню з силікатами нерудним мінералом. Його зернисті агрегати присутні у вигляді малих (до 3,0 мм) включень у рудних агрегатах.

Гранулометричний склад вихідної проби і розподіл заліза за класами розміру наведені у табл. 2.

*Таблиця 2*

Гранулометричний склад вихідної проби										
Гранулометричні фракції, мм	+5	5+2	2+1	1+0,5	0,5+0,25	0,25+0,16	0,16+0,1	0,1+0,05	0,05-0	Всього
Вихід фракцій, %	6,85	35,35	17,55	10,80	7,55	3,60	2,75	2,70	12,85	100
Вміст заліза загального, %	59,88	58,50	57,31	56,52	55,92	55,13	53,75	51,77	47,02	56,07

Аналіз отриманих результатів показує, що у складі матеріалу проби спостерігається тенденція зменшення вмісту заліза загального зі зменшенням розміру. З даних табл. 2 випливає, що від найбільш крупнозернистого до найбільш тонкозернистого матеріалу проби вміст заліза закономірно зменшується у зв'язі з двома обставинами:

– агрегати мартита і залізної слюдки присутні, переважно, у складі великих частинок;

– пилевидна нерудна (кремністо-глиниста) складова накопичується, головним чином, у тонкозернистому матеріалі досліджуваних проб.

Метою дослідження було, порівняння показників збагачення при розрушенні мінералів у руді дробленням у валкової дробилки шляхом раздавлення агрегатів і частинок і змельченням з розрушенням частинок істиранням, що пов'язано з їх різною міцністю по Протоджяконову:

– мартит, залізна слюдка – 5-8;

– каолініт – 1-2.

Метою технологічних випробувань було дослідження динаміки процесів рудопідготовчих і збагачувальних апаратів з матеріалом досліджуваної проби і оцінка можливості отримання з низькокондиційного сиров'язя концентрату з вмістом  $\text{Fe}_{\text{общ}}$  не нижче 61% при максимально можливому його виході.

## **Підготовчі процеси збагачення**

При рудоподготовке, технологической пробы, было проведено сравнение влияния на показатели последующего обогащения, дробления ее в валковой дробилке, с сухим измельчением в стержневой мельнице. Конечная крупность дробления (измельчения) составляла 1-0 мм. Подготовленный материал направлялся на воздушную сепарацию. Результаты приведены в табл. 3.

Анализа данных табл. 3, показывает, что:

– после рудоподготовки руды в валковой дробилке, материал эффективно разделяется воздушной классификацией. При этом образуются продукты с содержанием железа общего от 48,15 до 62,91%. Выход пылевидной фракции составил 26,9%. Содержание железа общего в камерном продукте 1+2 составило 61,8% при его выходе 53,6;

– после рудоподготовки руды в стержневой мельнице, имеет место относительно равномерное распределение железа общего по камерным продуктам 1-3 (58,49-59,97%) при его значении в пылевидных отходах-50,27% и их выходе 34,3%. Содержание железа общего в камерном продукте 1+2 составило 59,3% при его выходе 50,8%.

Таблица 3

Сравнение результатов воздушной сепарации материала пробы, крупностью 1-0 мм полученной путем дробления в валковой дробилке и измельчения в стержневой мельнице

Продукты	Дробление в валковой дробилке		Измельчение в стержневой мельнице	
	содержание Fe <sub>общ.</sub> , %	выход, %	содержание Fe <sub>общ.</sub> , %	выход, %
Исходный	56,07	100,0	56,07	100,0
Камерный 1	62,91	27,7	59,97	14,9
Камерный 2	60,73	25,9	58,99	35,9
Камерный 3	54,05	19,5	58,49	14,9
Камерный 4 (пыль)	48,15	26,9	50,27	34,3
Камерный 1+2 (концентрат)	61,8	53,6	59,3	50,8

Таким образом, применение валковой дробилки для дробления данного вида сырья позволяет более селективно разрушить его компоненты чем измельчение в стержневой мельнице, переводя в мелкие классы менее крепкий каолинит, в то время как гематит остается в более крупных классах. Это при последующем обогащении обеспечивает более высокие технологические показатели. Данный тип оборудования в виде промышленного аппарата – роллер-пресса рекомендован для применения в разрабатываемой технологии обогащения данного вида руды.

Исследования по обогатимости низкоконтиниционного крупнокускового отсева ДСФ шахты им. Фрунзе были проведены на материале крупностью 40-0 мм, с применением лабораторной центробежной дробилки НПО "Центр", стержневой мельницы и барабанного магнитного сепаратора с индукцией 0,7 Тл.

Гематитовая руда представлена двумя основными минералами – гематитом (рудный минерал) и кварцем (нерудный), которые присутствуют в материале как в раскрытой форме, так и в виде агрегатов (кварцита). Они существенно отличаются как по магнитным свойствам, так и по прочностным характеристикам. Гематит обладает магнитными свойствами, величина его удельной магнитной восприимчивости 88-220 м<sup>3</sup>/кг; кварц – немагнитный минерал.

Гранулометрический состав исходной пробы и распределение железа общего по классам крупности приведены в табл. 4.

Таблица 4

Гранулометрический состав исходной пробы							
Гранулометрические фракции, мм	+10	10+5	5+3	3+1	1+0	5+0	Всего
Выхода фракций, %	76,0	5,4	3,2	2,0	13,4	18,6	100
Содержание железа общего, %	41,95	46,81	48,58	52,79	60,22	57,32	42,1

Анализ гранулометрического состава исходной руды показывает (табл.4), что основная масса материала сосредоточена в классе +10 мм (76%). Выход класса 10-0 мм составил 24%, причем основная масса материала приходится на класс 1-0 мм (13,4%). При этом наблюдается обратная тенденция содержания Fe<sub>общ</sub> по классам крупности, по сравнению с отсевом ДСФ штата Орисса. В данной руде содержание Fe<sub>общ</sub> в классах с уменьшением крупности увеличивается и изменяется от 41,95% в классе +10 мм, до 60,22% в классе 1-0 мм. Содержание Fe<sub>общ</sub> в исходной руде составило 42,1%. Содержание Fe<sub>общ</sub> в классе 5-0 мм составило 57,32%, что близко к необходимому качеству аглоруды.

Целью исследования процесса дробления в центробежной дробилке отсева ДСФ шахты им. Фрунзе было, определение возможности и параметров селективного разрушения минералов в руде за счет кинетической энергии удара куска руды, что связано с их различной крепостью по Протодьяконову:

- богатая руда – 3-8;
- кварциты – 13-18.

В отличие от условий дробления отсева ДСФ штата Орисса, где в мелкую фракцию переводилась нерудная (бедная) часть материала, а богатая оставалась в крупной фракции, в данных исследованиях ставилась задача, подобрать такие режимы работы центробежной дробилки, при которых максимальное количество богатой руды и обогащенных кварцитов будет разрушено и перейдет в мелкие классы крупности, а бедные кварциты, соответственно, будут в минимальной степени разрушены. Максимальное количество бедных кварцитов должно сохранить начальные размеры. При этом ставилась задача получить из материала исследуемой пробы концентрат с содержанием Fe<sub>общ</sub> не ниже 56% при максимально возможном его выходе.

В ходе исследований был выбран режим работы центробежной дробилки с

## **Підготовчі процеси збагачення**

выходными показателями близкими к ожидаемым. Распределение минералов по классам крупности в исходной руде и в продуктах дробления и относительное изменение минералогического состава по классам крупности дробленого продукта приведены в табл. 5, 6.

Таблица 5

Распределение минералов по классам крупности  
в исходной руде и в продуктах дробления

Классы крупности, мм	Компоненты, %							
	Исходная проба				Продукт дробления			
	Рудные	Обог. кварцит	Кварцит	Нерудные	Рудные	Обог. кварцит	Кварцит	Нерудные
+10	5,85	17,33	52,21	0,61	2,95	8,38	40,02	0,36
10+5	0,62	1,17	3,55	0,05	1,17	4,06	10,87	0,51
5+1	1,21	1,03	2,74	0,22	1,78	5,00	9,21	0,17
1+0	4,93	3,70	4,07	0,70	6,79	2,37	2,94	3,42
∑ всех компонентов по классам крупности	100				100			

Таблица 6

Относительное изменение минералогического состава по классам крупности  
после дробления в центробежной дробилке

Классы крупности, мм	Компоненты, %		
	Рудные	Обогащенный кварцит	Кварцит
+10	-25,97	-28,95	12,66
10+5	-38,82	12,40	-0,50
5+1	-52,44	55,66	8,08
1+0	18,89	-44,68	-37,69

Анализ данных табл.5 и 6 показывает следующее.

В процессе дробления минералы перераспределились, относительно их распределения в исходной руде, следующим образом:

– в классе +10 мм – уменьшилось удельное содержание богатой руды на 26% (49,6% богатой руды было разрушено) и обогащенных кварцитов на 29% (51,7% обогащенных кварцитов было разрушено), при этом увеличилось удельное содержание кварцитов на 12,7% (23,4% кварцитов было разрушено);

– в классе 10-5 мм – уменьшилось удельное содержание богатой руды на 39% (абсолютное количество богатой руды увеличилось на 88%), уменьшилось удельное содержание обогащенных кварцитов на 45% (абсолютное количество обогащенных кварцитов увеличилось в 3,83 раза), незначительно выросло содержание кварцитов – на 8% (абсолютное количество кварцитов увеличилось в 2,36 раза).

– в классе 1-0 мм – увеличилось удельное содержание богатой руды на 18% (абсолютное количество богатой руды увеличилось на 38%), увеличилось

удельное содержание обогащенных кварцитов на 12,4% (абсолютное количество обогащенных кварцитов уменьшилось на 36%), уменьшилось удельное содержание кварцитов на 38% (абсолютное количество кварцитов уменьшилось на 28%).

В целом, динамика разрушения богатых руд и обогащенных кварцитов в классе крупности +10 мм одинакова. Со снижением крупности, увеличивается разрушение рудных минералов и снижается разрушение обогащенных кварцитов. Величина разрушения кварцитов в двое ниже чем богатых руд.

При рудоподготовке, технологической пробы, было проведено сравнение влияния на показатели последующего обогащения, дробления ее в центробежной дробилке, с сухим измельчением в стержневой мельнице. Конечная крупность измельчения составляла 3-0 мм. Подготовленный материал направлялся на сухую магнитную сепарацию. Результаты приведены в табл. 7.

*Таблица 7*

Сравнение результатов сухой магнитной сепарации руды, полученной путем дробления исходного материала в центробежной дробилке и измельчения в стержневой мельнице

Продукты	Условия обогащения			
	Сухая магнитная сепарация дробленой руды центробежной дробилки крупностью 10-0 мм		Сухая магнитная руды измельченной в стержневой мельнице крупностью 3-0 мм	
	содержание Fe <sub>общ</sub> , %	выход, %	содержание Fe <sub>общ</sub> , %	выход, %
Питание	100,0	42,1	100,0	42,1
Концентрат	57,2	28,3	50,8	36,0
Хвосты	36,1	71,7	37,2	64,0

Анализа данных табл. 7, показывает, что:

– после рудоподготовки руды в центробежной дробилке, материал эффективно разделяется магнитной сепарацией. Содержание железа общего в магнитном продукте составило 57,2% при его выходе 28,3%;

– после рудоподготовки руды в стержневой мельнице содержание железа общего в магнитном продукте составило 50,8% при его выходе 36,0%;

– более высокие технологические показатели получены на руде после центробежной дробилки в крупности 10-0 мм, в то время как измельчение в стержневой мельнице до крупности 3-0 мм не позволило получить требуемое качество концентрата.

Испытания показали, что применение центробежной дробилки для дробления данного вида сырья позволяет более селективно разрушить его компоненты чем измельчение в стержневой мельнице, переводя в мелкие классы менее крепкий гематит, в то время как кварцит остается в более крупных классах. Это при последующем обогащении обеспечивает более высокие технологические показатели. Данный тип оборудования рекомендован для применения в разрабатываемой технологии обогащения данного вида руды.



## **Підготовчі процеси збагачення**

*Выводы и направление дальнейших исследований.*

Таким образом, эффективное разделение компонентов крупнокусковых отсеков ДСФ, с получением товарной продукции в виде аглоруды, возможно только при их селективном разрушении путем раздавливания агрегатов и частиц в валковой дробилке или за счет кинетической энергии удара куска руды в центробежной дробилке. Направлением дальнейших исследований является повышение выхода концентрата за счет доработки хвостов обогащения.

© Николаенко К.В., Николаенко П.К., 2016

*Надійшла до редколегії 12.03.2016 р.  
Рекомендовано до публікації д.т.н. Т.А. Олійник*