

УДК 549 : 553.31 (477.63)

Евтехов В.Д., Демченко О.С., Евтехов Е.В., Филенко В.В., Смирнов А.Я., Тихливец С.В., Прилепа Д.Н., Береза Д.В., Георгиева Е.П.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МИНЕРАЛОГИЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА БОГАТЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД КРИВОРОЖСКОГО БАССЕЙНА

Приведены результаты гранулометрического, минералогического, химического изучения материала двух проб гематитовой руды криворожской шахты им. В.И.Ленина с содержанием железа около 55 мас.%. Было определено, что руды имеют практически биминеральный состав (гематит + кварц). Показано, что с использованием додробливания, грохочения, сухой магнитной сепарации возможно повышение содержания железа в полезном конечном продукте до значений не ниже 60 мас.%, что будет способствовать повышению конкурентоспособности товарной руды на мировом рынке железорудного сырья.

Актуальность. Разработка залежей богатых железных руд Криворожского бассейна ведется семью шахтами и двумя карьерами. Минимальное содержание железа в составе руд 46 мас.%, максимальное более 69 мас.%, средний показатель для руд разведанных залежей в настоящее время составляет около 57 мас.% [2-6]. Недостаточный уровень селективности добычи руд является причиной попадания в рудный материал низкожелезистых и безжелезистых компонентов – гематитовых и безрудных кварцитов, сланцев и других горных пород [1]. В результате среднее содержание железа в составе добываемой рудной массы составляет 52-54 мас.%, что значительно ниже требований мирового рынка к агломерационной руде.

Нарастающее несоответствие качества добываемого железорудного сырья требованиям металлургических предприятий явилось причиной строительства на протяжении 60-70-х годов XX ст. на всех шахтах Кривбасса дробильно-сортировочных фабрик (ДСФ). Работа их основана на использовании метода трехста-

дийного дробления добытой рудной массы с постадийным грохочением продуктов дробления. В результате содержание железа в составе наиболее мелкозернистого (размер частиц обычно менее 20 мм) конечного рудного материала, являющегося товарной агломерационной рудой, поднимается от 52-54 до 55-57 мас.% [1].

На протяжении последних лет в связи со снижением потребления железорудного сырья возросли требования к содержанию железа в составе аглоруды до 60-61 мас.%. Объемы поставок руды с содержанием железа 55-57 мас.% минимизировались. В связи с этим за последние три года на складах горнодобывающих предприятий Кривбасса накопилось более 5 млн. т. нереализованной товарной аглоруды со средним содержанием железа около 55 мас.%; складирование этого материала продолжается. Возникла проблема очистки складов от не пользующегося спросом железорудного сырья и разработки мер, направленных на повышение содержания железа в составе конечного полезного продукта ДСФ до 60

и более мас.%. Минералогическое обоснование решения этих задач рассмотрено в настоящей статье.

Цель работы – изучить минералогические особенности товарных агломерационных руд низкого качества и составить рекомендации к разработке эффективной технологии повышения в них содержания железа.

Исходный материал. При проведении минералого-технологических экспериментов в качестве исходного материала использовалась руда шахты им. В.И.Ленина, расположенной в северной части Саксаганского железорудного района Криворожского бассейна. Выбор шахты был обусловлен тем, что производимые здесь товарные аглоруды характеризуются наиболее низким общим содержанием железа по сравнению с рудами других шахт Кривбасца.

Шахта им. В.И.Ленина, как и другие шахты Криворожского бассейна, разрабатывает залежи богатых железных руд саксаганского вида. Главными их особенностями являются существенно гематитовый состав, высокая пористость, низкая прочность. Минералогические, химические, физические, технические и технологические показатели руд используются при их обогащении на ДСФ шахты. Полезным конечным продуктом является товарная агломерационная руда с общим содержанием железа около 55 мас.%.

Одно из главных направлений увеличения этого показателя до 60-61 мас.% состоит в повышении степени обогащения извлекаемой из недр рудной массы с использованием технологических операций, которые могли бы дополнить используемые на ДСФ дробление и грохочение руд. Выбор оптимального технологического решения возможен на основе результатов детального минералогического изучения рудного материала.

Объектом исследований были две укрупненные лабораторные пробы гематитовой руды массой более 700 кг.

Проба 1 – руда с крупностью частиц -80+0 мм, отобранная с конвейера ДСФ после второй стадии дробления; масса пробы составляла 767 кг; общее содержание железа в составе ее материала 54,19 мас.%.

Проба 2 – агломерационная руда с крупностью частиц -16+0 мм, отобранная из склада готовой продукции ДСФ, не реализуемой в связи с низким качеством; масса пробы составляла 725 кг, общее содержание железа в составе ее материала – 55,33 мас.%.

Материал Пробы 1 был рассеян с помощью грохота с диаметром отверстий 10 мм на две гранулометрические фракции: 1) с размером частиц -10+0 мм – в дальнейшем именуется **Продукт 1**; и 2) с размером частиц -80+10 мм. Материал последней с помощью щековой дробилки был издроблен до крупности частиц -10+0 мм; в результате был получен материал, именуемый в дальнейшем **Продукт 2**. Было определено содержание железа в обоих продуктах, оно составило: Продукт 1 – 61,23 мас.%; Продукт 2 – 44,82 мас.%. Таким образом, уже после грохочения материала Пробы 1 был получен полезный конечный продукт с требуемым содержанием железа (более 60 мас.%; выход его составил 56,19% (рис. 1).

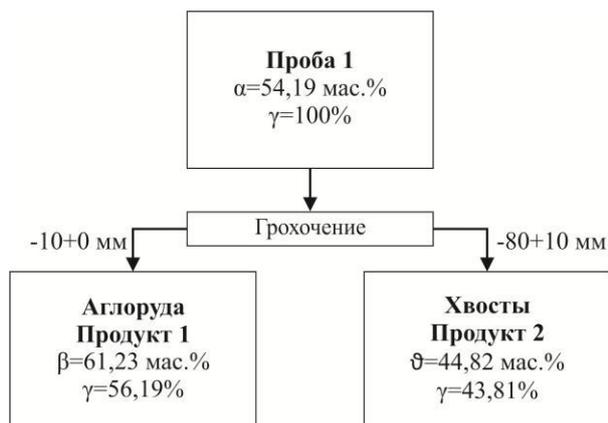


Рис. 1. Характер перераспределения материала Пробы 1 в результате его грохочения по классу крупности 10 мм.

Проба 2 при проведении описанных ниже минералого-технологических экспериментов именовалась **Продуктом 3**.

Результаты работы и их обсуждение.

Минералогические особенности аглоруды. Материал Продуктов 1, 2 и 3 был подвергнут ручной макроскопической (частицы размером более 3 мм) и микроскопической рудоразбор-

ке. Последняя производилась с использованием бинокулярного (размер частиц 0,1-3 мм) и петрографического (менее 0,1 мм) микроскопов. С учетом выходов гранулометрических фракций, плотности минералов и их агрегатов

были рассчитаны средние показатели содержания минеральных разновидностей руд и горных пород в составе Продуктов 1, 2, 3 (табл. 1).

Таблица 1.

Содержание главных разновидностей богатых гематитовых руд и горных пород в составе изученных продуктов

Минеральные разновидности руд и горных пород	Содержание, мас.%		
	Продукт 1	Продукт 2	Продукт 3
руды богатые железослюдко-мартитовые, мартитовые, дисперсногематит-мартитовые, мартит-дисперсногематитовые	85,20	25,78	60,55
кварциты железослюдко-мартитовые, мартитовые, дисперсногематит-мартитовые, мартит-дисперсногематитовые обогащенные	9,28	14,74	21,85
кварциты железослюдко-мартитовые, мартитовые, дисперсногематит-мартитовые, мартит-дисперсногематитовые рядовые	4,08	52,51	15,08
кварциты малорудные гематитовые (мартитовые, дисперсногематит-мартитовые, мартит-дисперсногематитовые) и безрудные (мономинеральные, силикатные)	0,63	5,15	1,67
сланцы	0,72	1,25	0,64
кварц жильный	0,09	0,57	0,21
Всего	100,00	100,00	100,00
Количество определений	27	25	28

Результаты рудоразборки показали, что частицы Продуктов 1, 2, 3 характеризуются разным количественным соотношением рудных и нерудных минералов. По этому показателю в обобщенном виде частицы можно разделить на три категории:

1) рудные частицы, сложенные на 95-100 объемн.% рудными минералами – мартитом, в меньшем количестве железной слюдкой и в незначительном – дисперсным гематитом («гидрогематитом»), а также гетитом и магнетитом (рис. 2);

2) рудно-нерудные сростки, сложенные кварцем и рудными минералами с примесью силикатов и карбонатов (рис. 3); содержание рудных минералов в их составе 5-95 объемн.%; по количественному соотношению рудных минералов и кварца сростки можно разделить на богатые (50-95 объемн.% рудных минералов) и бедные (5-50%);

3) нерудные частицы (рис. 4), представленные, преимущественно, кварцем с примесью силикатов и карбонатов; содержание рудных минералов в их составе 0-5 объемн.%.

По данным микроскопического изучения прозрачных и полированных шлифов, изготовленных из частиц рудной массы, материал изученных продуктов имеет, практически, биминеральный состав: мартит + кварц. Их суммарное содержание превышает 95 объемн.%. Второстепенное значение имеют железная слюдка, дисперсный гематит, магнетит, гетит, дисперсный гетит, реликтовые и новообразованные железо-содержащие и безжелезистые силикаты и карбонаты, сульфиды, сульфаты.

Мартит – главный рудный минерал – является продуктом выветривания первичного магнетита. Образует псевдоморфозы по кристаллам и агрегатам магнетита, вследствие чего его агрегаты наследуют формы выделений исходного магнетита, часто имеют изометричные очертания (рис. 3в, г). В мономинеральных агрегатах рудных частиц и в богатых рудно-нерудных сростках мартит представлен сплошными пористыми относительно однородными массами (рис. 2а, 3а). В обломках рудных прослоев гематитовых кварцитов, кото-

рыми чаще всего представлены рудно-нерудные сростки, мартит образует ленточные, блоковые, ветвистые агрегаты. В обломках нерудных прослоев гематитовых кварцитов, которыми обычно представлены нерудные частицы, мартит отмечается редко – обычно в

виде включений в агрегатах кварца (рис. 4б). Размер выделений мартита соответствует размеру кристаллов исходного магнетита, изменяется, преимущественно, от 0,01 до 0,15 мм, наиболее часто встречаются показатели 0,05-0,07 мм.

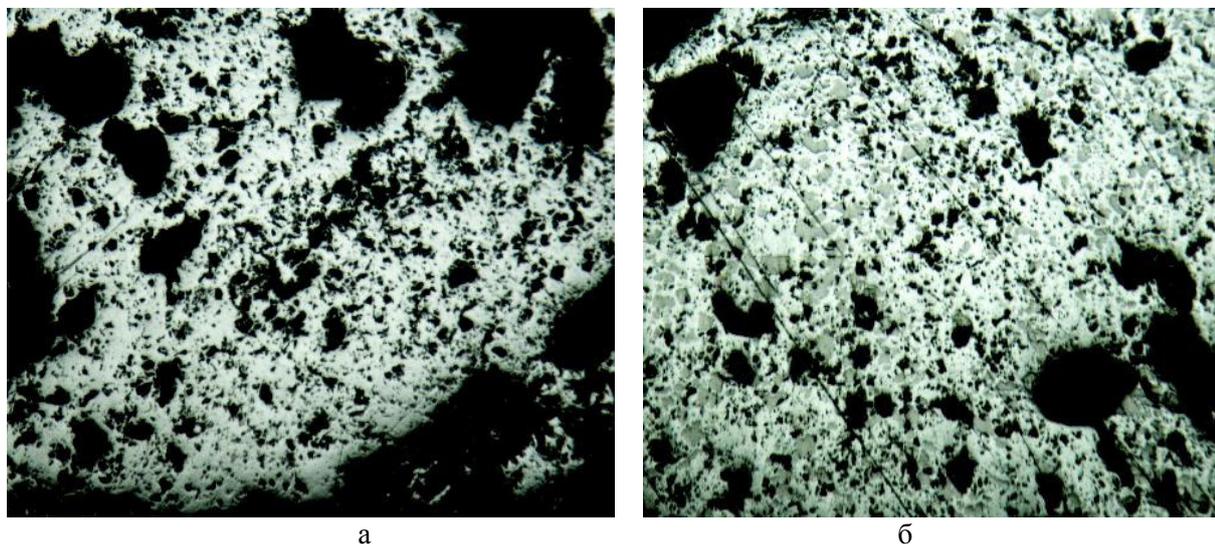


Рис. 2. Особенности структуры и минерального состава рудных частиц, присутствующих в составе агломерационной руды шахты им. В.И.Ленина.

Светлосерое – гематит (мартит); серое – магнетит (б); черное – поры.
Отраженный свет; без анализатора; увеличение 55^x.

Железная слюдка – пластинчатая, чешуйчатая разновидность гематита – относится к реликтовым минералам руд, входившим в состав исходных магнетитовых руд или магнетитовых кварцитов. В составе рудных частиц агломерационной руды присутствует в виде трудно диагностируемых включений в зернистых агрегатах мартита (рис. 2а). В составе рудно-нерудных сростков и нерудных частиц обычно представлена чешуйчатыми, пластинчатыми, таблитчатыми включениями в нерудных (кварцевых) прослоях обломков гематитовых кварцитов (рис. 4б). Значительно реже отмечается крупнопластинчатая разновидность железной слюдки (спекулярит) в составе обломков гематит-кварцевых гидротермальных жил (рис. 3б). Размер индивидов железной слюдки от менее 0,001 до более 1,0 мм по максимальному изме-

рению, преобладают индивиды размером 0,01-0,05 мм.

Магнетит является реликтовым минералом руд и попадающих в рудную массу железистых кварцитов, сохранившимся от их первичных магнетитовых разновидностей. Изредка присутствует в составе сланцев, других горных пород. В процессе выветривания, которое испытали как руды, так и горные породы, магнетит замещался мартитом. Минерал представлен мелкими (от менее 0,01 до 0,05 мм), обычно имеющими сложную форму реликтами, сохранившимися в центральных частях агрегатов мартита (рис. 2б, 3в). В общем случае с увеличением глубины отработки рудных залежей (в связи с ослаблением действия агентов выветривания) содержание магнетита возрастает – в меньшей степени в составе богатых руд и в большей степени – в составе же-

лезистых кварцитов. В материале изученных проб и продуктов их дробления среднее содержание магнетита составляло: в частицах богатых руд в среднем около 2 объемн.%, в частицах гематитовых кварцитов около 5 объемн.%, в нерудных частицах около 0,2 объемн.%. Этим объясняется преимущественный захват частиц гематитовых кварцитов в состав магнитной фракции при низких значениях магнитной индукции в ходе экспериментов.

Кварц – главный нерудный минерал рудно-нерудных сростков и нерудных частиц. В рудных частицах аглоруды присутствует в незначительном (не более 5 объемн.%) количестве в виде отдельных включений размером не более 0,1 мм. В сростках, представленных, главным образом, обломками гематитовых кварцитов, кварц слагает нерудные прослой – мономинеральные или с включениями железной слюдки, мартита (рис. 3). Нерудные частицы аглоруды сложены кварцем на 95-100 объемн.% (рис. 4).

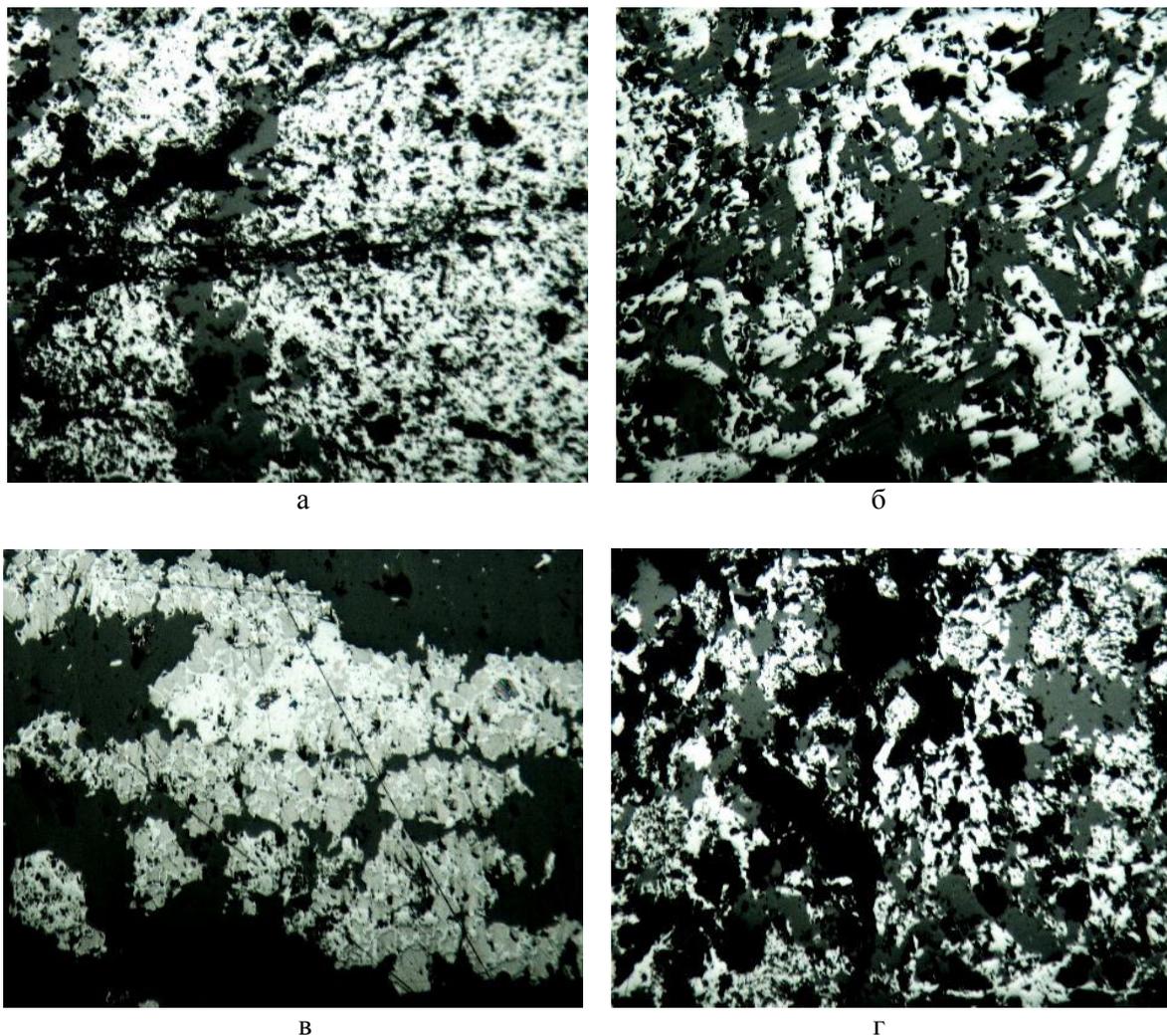
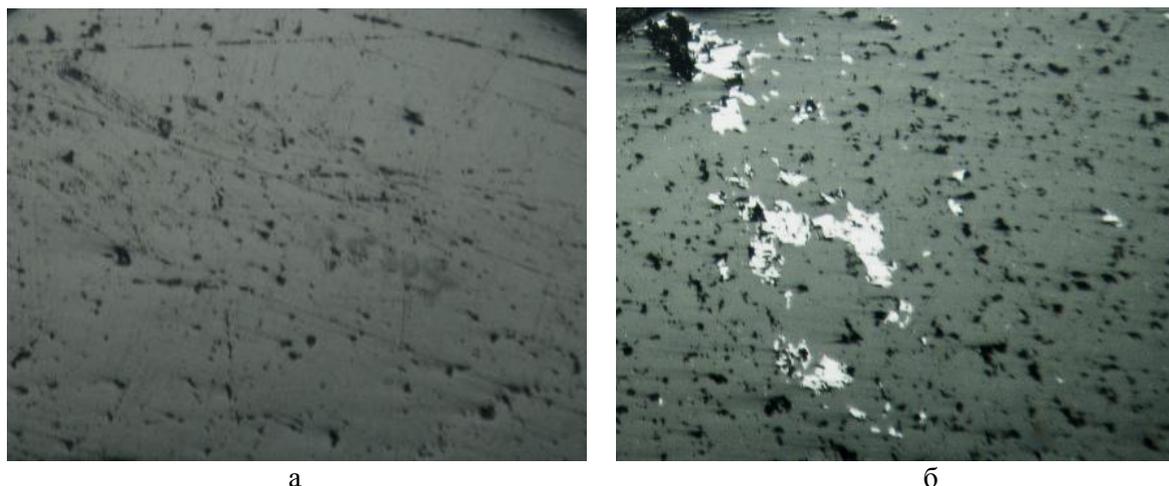


Рис. 3. Особенности структуры и минерального состава рудно-нерудных сростков, присутствующих в составе агломерационной руды.

Светлосерое – гематит (зернистый – мартит (рис. 2а, 2в, 2г), пластинчатый – железная слюдка (рис. 2б, 2г)); серое – магнетит (рис. 2в); темносерое – кварц; черное – поры.

Отраженный свет; без анализатора; увеличение 55^x.



а

б

Рис. 4. Особенности структуры и минерального состава нерудных частиц, присутствующих в составе агломерационной руды.

Светлосерое – гематит (мартит и железная слюдка); темносерое – кварц; черное – поры. Отраженный свет; без анализатора; увеличение 55^x.

Второстепенное значение в составе производимой шахтой агломерационной руды, как было отмечено выше, имеют:

- дисперсный (пылевидный) гематит – среднее содержание около 0,5 объемн.%;
- нерудные минералы (силикаты и карбонаты): каолинит, серпентин, тальк, кальцит, доломит (суммарно не более 0,5 объемн.%, каждого не более 0,1-0,2%).

Эффективное разделение минеральных частиц при обогащении происходит при условии существования между ними значительного градиента по одному или нескольким физическим свойствам. Исходя из минерального состава частиц агломерационной руды, эффективную технологическую схему дообогащения аглоруды можно разработать с учетом магнитных свойств и плотности разделяемых частиц.

Магнитность рудообразующих минералов отличается на порядки:

- присутствующий в составе рудных агрегатов реликтовый магнетит относится к сильным ферромагнетикам, характеризуется высокой удельной магнитной восприимчивостью;
- главный рудный минерал – гематит является антиферромагнетиком, имеет удельную магнитную восприимчивость на порядок ниже

магнетита; близкие магнитные показатели характерны также для гетита;

- кварц, силикаты и карбонаты – практически немагнитные диа- и парамагнетики.

Плотность минералов, которая в значительной мере определяет массу частиц и в связи с этим поведение их в гравитационных аппаратах, а также эффективность их прилипания к барабанам магнитных сепараторов, составляет:

- рудные частицы, состоящие из гематита и реликтового магнетита, – в среднем около 5100 кг/м³, колебания от 5000 до 5200 кг/м³;
- рудно-нерудные сростки с разным количественным соотношением гематита и кварца, – в среднем около 3900 кг/м³, колебания от 2700 до 5000 кг/м³;
- нерудные частицы, состоящие, главным образом, из кварца, – в среднем около 2700 кг/м³, колебания от 2600 до 2800 кг/м³.

Таким образом, наибольший диссонанс в закономерный ход дообогащения агломерационной руды вносят рудно-нерудные сростки. Плотность их частиц изменяется в широких пределах (от 2700 до 5000 кг/м³), а магнитные показатели также характеризуются не всегда прогнозируемой вариативностью в связи со

значительными колебаниями количества в их составе гематита (от 5 до 95 объемн.%) и повышенным содержанием магнетита (как отмечалось выше, в среднем около 5 мас.%) по сравнению с рудными частицами (около 2 мас.%) и нерудными частицами (около 0,2 мас.%).

Следовательно, с минералогических позиций, наибольшее внимание при разработке технологии повышения качества агломерационной руды необходимо уделить эффективности разделения рудно-нерудных сростков на:

– богатые (с содержанием гематита 50-95 объемн.%), которые можно вовлечь в состав полезного конечного продукта совместно с рудными частицами (95-100 объемн.% гематита);

– бедные (5-50 объемн.% гематита), которые необходимо сбросить в отходы обогащения совместно с нерудными частицами (0-5 объемн.% гематита).

Принимая во внимание минеральный и гранулометрический состав агломерационных руд, опыт действующих обогатительных установок (предприятия «Гамаюн», «Укрмеханобр»), наличие отечественного оборудования, простоту технологии, был сделан выбор в

пользу технологической схемы, основанной на «сухой» магнитной сепарации рудного материала.

Эксперименты проводились в лабораториях Научно-производственной фирмы «Продэкология» (г. Ровно). Основными технологическими операциями были «сухая» магнитная сепарация рудного материала и грохочение исходного материала и магнитных продуктов.

Результаты технологических испытаний.

Продукт 1, как отмечалось выше, представлял мелкозернистую фракцию руды (крупность частиц -10+0 мм), полученную путем высеивания из материала исходной Пробы 1, крупность частиц которого составляла -80+0 мм.

Материал Продукта 1 был разделен в магнитном поле на четыре магнитные фракции: МФ 1.1, МФ 1.2, МФ 1.3 и НМФ 1. Было определено содержание $Fe_{общ.}$ в составе Продукта 1 и полученных из него магнитных фракций; анализы выполнялись в химической лаборатории Государственной инспекции «ГИК Южруда». Результаты расчета выходов магнитных фракций и определения содержания железа в их составе приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Общее содержание железа и выходы магнитных фракций Продукта 1

Индексы фракций	Изученный материал	Содержание $Fe_{общ.}$, мас.%	Выходы фракций, %
продукт 1	материал фракции -10+0 мм, выделенный из материала исходной Пробы 1 путем грохочения	61,23	100,00
МФ 1.1	магнитная фракция 1.1	56,64	5,63
МФ 1.2	магнитная фракция 1.2	63,42	70,78
МФ 1.3	магнитная фракция 1.3	59,23	15,72
НМФ 1	немагнитная фракция 1	51,46	7,87

Из данных табл. 1 следует, что, как отмечалось выше, уже после грохочения по гранулометрическому классу 10 мм из материала Пробы 1 был получен Продукт 1, который по содержанию железа соответствует требуемым показателям: количество $Fe_{общ.}$ в его составе превышает 61 мас.%.
Полученные после сухой магнитной сепарации четыре магнитные фракции Продукта 1 (табл. 1) можно скомпоновать следующим образом (рис. 5):

– МФ 1.2 – с содержанием железа 63,42 мас.% и выходом 70,78%;

– МФ 1.2 + МФ 1.3 – со средневзвешенным содержанием железа 62,65 мас.% и общим выходом 86,50%;

– МФ 1.2 + МФ 1.3 + МФ 1.1 – со средневзвешенным содержанием железа 62,29 мас.% и общим выходом 92,13%.

Таким образом, если методом сухой магнитной сепарации удалить из Продукта 1 немагнитную фракцию НМФ 1, будет получен поле-

зный конечный продукт со содержанием железа 62,29 мас.%; выход его составит 92,13% от массы Продукта 1.

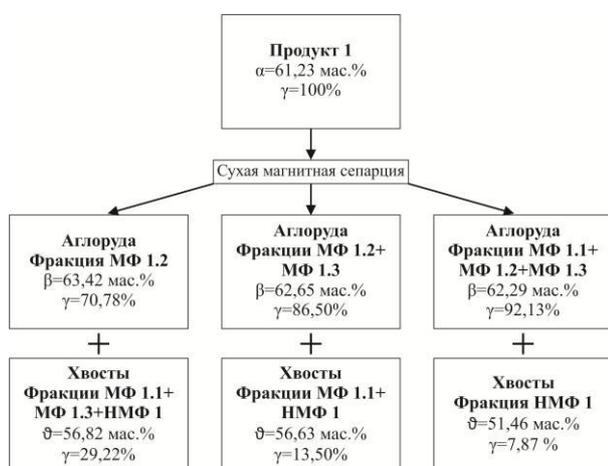


Рис. 5. Характер перераспределения материала Продукта 1 по фракциям, полученным в результате его сухой магнитной сепарации.

Материал продукта 1 и полученных из него магнитных фракций был разделен с использованием стандартных сит на granulometricкие фракции +10 мм; -10+5 мм; -5+1 мм; -1+0,25 мм; -0,25+0 мм. Материал granulomet-

рических фракций был подвергнут микроскопической рудоразборке с использованием бинокулярного и петрографического микроскопов. Определялось количественное соотношение рудных, нерудных частиц и рудно-нерудных сростков (табл. 2-6).

Как видно, материал Продукта 1 и полученных из него магнитных фракций состоял, преимущественно, из рудных частиц. В составе наиболее мелкозернистого материала с размером частиц менее 5 мм количество рудных частиц стабильно превышало 50 мас.%. Пониженные минералогические показатели магнитной фракции МФ 1.1 связаны с тем, что она была получена при наиболее низком значении магнитной индукции. Вследствие этого в ее состав были вовлечены, преимущественно, частицы гематитовых кварцитов, отличавшиеся от рудных частиц более низким содержанием железа и повышенным содержанием магнетита. Нерудные частицы (жильный кварц, фрагменты нерудных прослоев железистых кварцитов) в этом материале были представлены незначительно – в составе каждой granulometricкой фракции не более 5 мас.%.

Таблица 2.

Результаты микроскопической рудоразборки материала granulometricких фракций Продукта 1

Granulometricкие фракции, мм	Выходы фракций, %	Содержание Fe _{общ.} , мас.%	Содержание частиц, мас.%			
			рудных	сростков	нерудных	всего
+10	3,20	49,93	36,75	63,25	–	100,00
-10+5	4,20	53,92	49,42	50,58	–	100,00
-5+1	27,60	55,00	53,31	46,28	0,41	100,00
-1+0,25	23,90	63,50	82,15	14,69	3,16	100,00
-0,25+0	41,10	65,44	93,10	2,71	4,19	100,00
Всего	100,00	61,23				

Таблица 3.

Результаты микроскопической рудоразборки материала магнитной фракции МФ 1.1

Granulometricкие фракции, мм	Выходы фракций, %	Содержание Fe _{общ.} , мас.%	Содержание частиц, мас.%			
			рудных	сростков	нерудных	всего
+10	2,50	42,87	–	100,00	–	100,00
-10+5	9,70	44,07	17,21	82,79	–	100,00
-5+1	26,20	45,55	19,86	80,14	–	100,00
-1+0,25	15,70	59,94	69,15	29,77	1,08	100,00
-0,25+0	45,90	65,05	88,06	10,02	1,92	100,00
Всего	100,00	56,64				

Таблица 4.

Результаты микроскопической рудоразборки материала магнитной фракции МФ 1.2

Гранулометрические фракции, мм	Выходы фракций, %	Содержание Fe _{общ.} , мас. %	Содержание частиц, мас. %			
			рудных	сростков	нерудных	всего
+10	0,50	27,25	–	100,00	–	100,00
-10+5	1,90	54,13	47,18	52,82	–	100,00
-5+1	18,20	58,08	66,41	33,34	0,25	100,00
-1+0,25	29,50	64,04	85,68	12,40	1,92	100,00
-0,25+0	49,90	65,25	92,22	4,34	3,44	100,00
Всего	100,00	63,42				

Таблица 5.

Результаты микроскопической рудоразборки материала магнитной фракции МФ 1.3

Гранулометрические фракции, мм	Выходы фракций, %	Содержание Fe _{общ.} , мас. %	Содержание частиц, мас. %			
			рудных	сростков	нерудных	всего
+10	2,30	50,53	–	100,00	–	100,00
-10+5	10,60	55,42	45,41	54,59	–	100,00
-5+1	62,80	58,39	69,44	30,25	0,31	100,00
-1+0,25	10,70	60,13	78,15	19,72	2,13	100,00
-0,25+0	13,60	64,65	93,38	2,55	4,07	100,00
Всего	100,00	59,23				

Таблица 6.

Результаты микроскопической рудоразборки материала немагнитной фракции НМФ 1

Гранулометрические фракции, мм	Выходы фракций, %	Содержание Fe _{общ.} , мас. %	Содержание частиц, мас. %			
			рудных	сростков	нерудных	всего
+10	10,90	45,77	28,86	71,14	–	100,00
-10+5	39,70	50,12	40,65	59,35	–	100,00
-5+1	41,30	51,78	46,17	52,27	1,56	100,00
-1+0,25	3,40	54,62	58,34	39,79	1,87	100,00
-0,25+0	4,70	65,45	92,59	2,68	4,73	100,00
Всего	100,00	51,46				

Это дает основание предположить, что путем изменения режима сепарации можно понизить выход фракции НМФ 1 до 5% и одновременно уменьшить содержание в ее составе железа, ориентировочно, до 45 мас.%. В результате можно поднять выход полезного конечного продукта с общим содержанием железа не менее 62 мас.% на 2% – до 95% от общей массы Продукта 1.

Поскольку Продукт 1 по содержанию железа (около 61 мас.%) соответствует требованиям (более 60 мас.% железа), рациональность его сухой магнитной сепарации с целью повышения этого показателя до 62-63 мас.% следует определить, основываясь на техниче-

ских, технологических, экономических расчетах.

Продукт 2 представлял материал, полученный в результате дробления крупнозернистой (-80+10 мм) фракции исходной Пробы 1 до крупности частиц 10-0 мм.

Материал Продукта 2 был разделен в магнитном поле на три магнитных продукта: МФ 2.1, МФ 2.2, МФ 2.3 и один немагнитный продукт НМФ 2. Результаты расчета их выходов и определения содержания железа в их составе приведены в табл. 7. Как видно, сухая магнитная сепарация материала Продукта 2 способствовала увеличению содержания железа в составе магнитных фракций МФ 2.1, МФ 2.2 и МФ 2.3 (48-50 мас.%) на 3-5 мас.% по сравне-

нию с его содержанием в исходном Продукте 2 (около 45 мас.%), но не позволила получить конечные продукты с требуемым (более 60 мас.%) содержанием железа.

Для выяснения возможности повышения содержания железа в продуктах обогащения Продукта 2 были проведены:

– рассев исходного материала Продукта 2 и полученных из него трех магнитных и одной немагнитной фракции на 5 гранулометрических фракций;

– микроскопическая рудоразборка материала этих фракций (табл. 8).

Таблица 7.

Общее содержание железа и выходы магнитных фракций Продукта 2

Индексы фракций	Изученный материал	Содержание Fe _{общ.} , мас.%	Выходы фракций, %
продукт 2	продукт дробления материала фракции -80+10 мм исходной Пробы 1 до крупности частиц -10+0 мм	44,82	100,00
МФ 2.1	магнитная фракция 2.1	48,17	11,41
МФ 2.2	магнитная фракция 2.2	48,07	23,56
МФ 2.3	магнитная фракция 2.3	49,66	36,12
НМФ 2	немагнитная фракция 2	34,30	28,91

Таблица 8.

Результаты микроскопической рудоразборки материала гранулометрических фракций Продукта 2

Гранулометрические фракции, мм	Выходы фракций, %	Содержание Fe _{общ.} , мас.%	Содержание частиц, мас.%			
			рудных	сростков	нерудных	всего
+10	9,60	37,60	10,68	89,32	-	100,00
-10+5	34,30	41,68	31,86	58,13	10,01	100,00
-5+1	39,60	44,39	53,22	30,28	16,50	100,00
-1+0,25	7,70	53,81	65,84	20,96	13,20	100,00
-0,25+0	8,80	55,94	79,33	10,83	9,84	100,00
Всего	100,00	44,82				

Результаты рудоразборки показали, что в составе наиболее мелкозернистой части Продукта 2 (табл. 8) и полученных из него магнитных фракций (частицы размером менее 5 мм) содержание рудных частиц превышает 50 мас.% (табл. 9-11). Таким образом, путем грохочения Продукта 2 с выделением гранулометрической фракции -5+0 мм можно поднять содержание железа в его материале до 52-53

мас.%. Выход этой гранулометрической фракции составит не менее 60-70% от общей массы Продукта 2. Поскольку в составе этого материала преобладают рудные частицы, можно прогнозировать, что при использовании в дальнейшем сухой магнитной сепарации из него возможно производство аглоруды с содержанием железа не менее 60 мас.%.

Таблица 9.

Результаты микроскопической рудоразборки материала магнитной фракции МФ 2.1

Гранулометрические фракции, мм	Выходы фракций, %	Содержание Fe _{общ.} , мас.%	Содержание частиц, мас.%			
			рудных	сростков	нерудных	всего
+10	6,70	42,21	19,96	80,04	-	100,00
-10+5	33,70	44,60	25,38	73,47	1,15	100,00
-5+1	29,00	45,20	30,96	67,21	1,83	100,00
-1+0,25	7,40	53,81	66,05	23,12	10,83	100,00
-0,25+0	23,20	56,34	79,68	9,44	10,88	100,00
Всего	100,00	48,17				

Таблица 10.

Результаты микроскопической рудоразборки материала магнитной фракции МФ 2.2

Гранулометрические фракции, мм	Выходы фракций, %	Содержание Fe _{общ.} , мас.%	Содержание частиц, мас.%			
			рудных	сростков	нерудных	всего
+10	9,10	44,21	-	100,00	-	100,00
-10+5	30,60	44,93	20,09	79,91	-	100,00
-5+1	35,30	46,69	22,93	76,12	0,95	100,00
-1+0,25	11,60	55,48	60,43	36,45	3,12	100,00
-0,25+0	13,40	56,83	69,68	20,22	10,10	100,00
Всего	100,00	48,07				

Таблица 11.

Результаты микроскопической рудоразборки материала магнитной фракции МФ 2.3

Гранулометрические фракции, мм	Выходы фракций, %	Содержание Fe _{общ.} , мас.%	Содержание частиц, мас.%			
			рудных	сростков	нерудных	всего
+10	6,90	46,77	18,27	81,73	-	100,00
-10+5	37,80	46,62	25,71	74,29	-	100,00
-5+1	50,60	51,16	45,10	54,05	0,85	100,00
-1+0,25	3,90	54,68	65,12	32,73	2,15	100,00
-0,25+0	0,80	61,51	78,44	18,14	3,42	100,00
Всего	100,00	49,66				

Таблица 12.

Результаты микроскопической рудоразборки материала немагнитной фракции НМФ 2

Гранулометрические фракции, мм	Выходы фракций, %	Содержание Fe _{общ.} , мас.%	Содержание частиц, мас.%			
			рудных	сростков	нерудных	всего
+10	16,40	39,81	-	96,95	3,05	100,00
-10+5	55,90	35,42	-	98,12	1,88	100,00
-5+1	25,80	30,46	0,28	90,08	9,64	100,00
-1+0,25	1,70	32,63	3,14	79,71	17,15	100,00
-0,25+0	0,20	33,94	14,64	62,39	22,97	100,00
Всего	100,00	34,30				

Немагнитная фракция НМФ 2 состоит, преимущественно, из рудно-нерудных сростков (табл. 12). Количество рудных сростков очень низкое, что свидетельствует об эффективности отделения от рудного материала наиболее низкожелезистой его составляющей. По минералогическим и химическим показателям, можно рекомендовать сбросить материал этой фракции в отходы обогащения.

Продукт 3 (исходная Проба 2) представлял товарную агломерационную руду с крупностью частиц -16+0 мм и содержанием железа около 55 мас.%. Необходимо было оценить возможность повышения этого показателя до более 60 мас.%. Материал Продукта 3 был разделен в магнитном поле на три магнитных

продукта: МФ 3.1, МФ 3.2, МФ 3.3 и один немагнитный продукт НМФ 3 (табл. 13). Полученные результаты свидетельствуют, что с использованием сухой магнитной сепарации из Продукта 3 возможно производство конечного продукта необходимого качества: содержание железа в составе материала магнитной фракции МФ 3.2 около 60 мас.%, выход фракции составил около 53% (рис. 6).

Результаты микроскопической рудоразборки Продукта 3 и материала полученных из него магнитных фракций показали следующее (табл. 14-18).

В составе исходного Продукта 3 практически отсутствовали нерудные частицы (табл. 14): их количество в материале выделенных из

него гранулометрических фракций не превышало 4 мас.%. Таким образом, проблема производства из Продукта 3 полезного конечного магнитного продукта требуемого качества

состояла в эффективном отделении рудных частиц и богатых рудно-нерудных сростков от бедных сростков.

Таблица 13.

Общее содержание железа и выходы магнитных фракций Продукта 3

Индексы фракций	Изученный материал	Содержание Fe _{общ.} , мас.%	Выходы фракций, %
Продукт 3	аглолюда с крупностью частиц -16+0 мм	55,33	100,00
МФ 3.1	магнитная фракция 3.1	47,37	6,95
МФ 3.2	магнитная фракция 3.2	60,12	52,77
МФ 3.3	магнитная фракция 3.3	56,64	23,29
НМФ 3	немагнитная фракция 3	43,28	16,99



Рис. 6. Характер перераспределения материала Продукта 3 в результате его сухой магнитной сепарации.

Этого удалось достигнуть при режимах обогащения, которые позволили выделить магнитную фракцию МФ 3.2 (табл. 16). В ее составе удалось повысить на 10-15% содержание рудных частиц и на такое же количество сни-

зить содержание бедных сростков. Этого оказалось достаточным для того, чтобы увеличить содержание железа в составе материала на 5 мас.% – с 55 до 60 мас.% (табл. 14, 16).

Материал магнитных фракций МФ 3.1 и МФ 3.3 с содержанием железа 55-56 мас.% характеризовался повышенным количеством рудных частиц, особенно в составе мелкозернистой составляющей (5-0 мм). Содержание железа в ее материале, расчетно, составило 58-59 мас.%. Таким образом, после высеивания из материала магнитных фракций МФ 3.1 и МФ 3.3, его можно использовать для подмешивания в более высокожелезистые продукты или для производства методом сухой магнитной сепарации самостоятельного продукта с необходимыми качественными показателями. Выход конечного продукта с содержанием железа не менее 60 мас.% при этом составит 75-80% от массы исходного Продукта 3.

Таблица 14.

Результаты микроскопической рудоразборки материала гранулометрических фракций Продукта 3

Гранулометрические фракции, мм	Выходы фракций, %	Содержание Fe _{общ.} , мас.%	Содержание частиц, мас.%			
			рудных	сростков	нерудных	всего
+10	14,60	44,94	22,40	77,60	–	100,00
-10+5	13,10	47,26	35,28	64,72	–	100,00
-5+1	26,50	49,90	45,63	53,92	0,45	100,00
-1+0,25	15,80	61,15	79,41	18,01	2,58	100,00
-0,25+0	30,00	64,42	91,56	4,37	4,07	100,00
Всего	100,00	55,33				

Таблица 15.

Результаты микроскопической рудоразборки материала магнитной фракции МФ 3.1

Гранулометрические фракции, мм	Выходы фракций, %	Содержание Fe _{общ.} , мас.%	Содержание частиц, мас.%			
			рудных	сростков	нерудных	всего
+10	17,10	32,18	–	100,00	–	100,00
-10+5	19,30	35,46	–	100,00	–	100,00
-5+1	20,30	44,72	19,14	80,86	–	100,00
-1+0,25	8,20	57,15	75,70	19,04	5,26	100,00
-0,25+0	35,10	62,28	89,15	2,37	8,48	100,00
Всего	100,00	47,37				

Таблица 16.

Результаты микроскопической рудоразборки материала магнитной фракции МФ 3.2

Гранулометрические фракции, мм	Выходы фракций, %	Содержание Fe _{общ.} , мас.%	Содержание частиц, мас.%			
			рудных	сростков	нерудных	всего
+10	5,20	44,93	12,44	87,56	–	100,00
-10+5	6,40	54,71	44,29	55,71	–	100,00
-5+1	17,00	56,86	54,50	45,50	–	100,00
-1+0,25	23,20	59,42	74,68	20,15	5,17	100,00
-0,25+0	48,20	64,62	92,66	3,08	4,26	100,00
Всего	100,00	60,12				

Таблица 17.

Результаты микроскопической рудоразборки материала магнитной фракции МФ 3.3

Гранулометрические фракции, мм	Выходы фракций, %	Содержание Fe _{общ.} , мас.%	Содержание частиц, мас.%			
			рудных	сростков	нерудных	всего
+10	11,70	50,10	34,97	65,03	–	100,00
-10+5	17,60	52,15	48,13	51,87	–	100,00
-5+1	53,60	56,66	53,84	45,10	1,06	100,00
-1+0,25	9,60	62,81	86,25	11,61	2,14	100,00
-0,25+0	7,50	64,02	94,39	1,59	4,02	100,00
Всего	100,00	56,64				

Таблица 18.

Результаты микроскопической рудоразборки материала магнитной фракции НМФ 3

Гранулометрические фракции, мм	Выходы фракций, %	Содержание Fe _{общ.} , мас.%	Содержание частиц, мас.%			
			рудных	сростков	нерудных	всего
+10	35,70	43,14	17,26	82,74	–	100,00
-10+5	28,10	42,18	16,15	83,85	–	100,00
-5+1	31,60	41,16	15,83	83,41	0,76	100,00
-1+0,25	3,30	58,81	73,46	23,39	3,15	100,00
-0,25+0	1,30	61,83	82,21	12,57	5,22	100,00
Всего	100,00	43,28				

Следовательно, путем подбора режимов сухой магнитной сепарации и комбинирования ее с грохочением, из Продукта 3 можно производить агломерационную руду с содержанием железа не ниже 60 мас.% и выходом 75-80%.

Немагнитная фракция НМФ 3 более чем на 80% была представлена рудно-нерудными сростками (табл. 18). Рудные сростки присутс-

твовали в ее составе в количестве 15-20%. Цельсообразность их доизвлечения следует изучить дополнительно.

Выводы

1. Были проведены минералогические, гранулометрические, химические исследования двух проб гематитовой руды шахты им.

В.И.Ленина и продуктов их сухой магнитной сепарации. Проба 1 представляла промежуточный продукт обогащения добытой из недр рудной массы с крупностью частиц 80-0 мм. Проба 2 – товарную агломерационную руду с крупностью частиц 16-0 мм.

2. По данным минералогических исследований, материал обеих проб имел практически биминеральный состав: кварц+гематит. В зависимости от их количественного соотношения, все частицы проб были разделены на рудные (менее 5 объемн.% кварца), сростки (5-95%) и нерудные (более 95%). Содержание магнетита в среднем составляло около 2 объемн.%, колебания от 0,2 до 5 объемн.%. Другие минеральные компоненты (гетит, дисперсный гематит, реликтовые и новообразованные силикаты, карбонаты) представлены в составе руд в незначительном количестве (каждый не более 0,5 объемн.%).

3. Материал обеих проб с исходным содержанием железа около 55 мас.% был подвергнут дообогащению с использованием методов грохочения и сухой магнитной сепарации. В соответствии с полученными результатами, из изученного рудной массы методом сухой магнитной сепарации и грохочения возможно производство товарной агломерационной руды с содержанием железа 60-63 мас.%; выход этого продукта можно прогнозировать на уровне 65-75% от массы исходного материала.

4. Дополнительного изучения требует вопрос возможного использования отходов гранулометрического (грохочение) и сухого магнитного обогащения низкокачественных богатых руд. Содержание железа в составе отходов превышает 40, а в ряде случаев 50 мас.%. Этот материал можно подвергать более глубокому измельчению и последующему гравитационному, магнитному обогащению с получением железорудного концентрата, аглоконцентрата или других полезных конечных продуктов.

5. Внедрение результатов минералогических исследований и технологических испытаний агломерационных руд шахт Криворожского бассейна в производство будет способствовать сохранению их конкурентоспособности на мировом рынке железорудного сырья.

ЛИТЕРАТУРА REFERENCES

1. **Азарян А.А., Колосов В.А., Ломовцев Л.А., Учитель А.Д.** Качество минерального сырья // *Кривой Рог: Минерал*, 2001.– 203 с.

1. **Azaryan A.A., Kolosov V.A., Lomovtsev L.A., Uchitel A.D.** [Kachestvo mineralnogo syrya (in Russian)] *The quality of mineral raw materials // Krivoy Rog: Mineral*, 2001.– 203 p.

2. **Белевцев Я.Н., Кравченко В.М., Кулик Д.А. и др.** Железисто-кремнистые формации докембрия европейской части СССР. Генезис железных руд // *Киев: Наукова думка*, 1991.– 215 с.

2. **Belevtsev Ya.N., Kravchenko V.M., Kulik D.A., e. a.** [Zhelezisto-kremnistye formatsyi dokembrya evropeyskoy chasti SSSR. Genезis zheleznyh rud (in Russian)] *Precambrian banded iron formation of the European part of the USSR. Genesis of iron ores // Kiev: Naukova dumka*, 1991.– 215 p.

3. **Белевцев Я.Н., Тохтуев Г.В., Стрыгин А.И. и др.** Геология криворожских железорудных месторождений // *Киев: Изд. АН УССР*, 1962.– Т. 1 – 484 с., т. 2 – 567 с.

3. **Belevtsev Ya.N., Tokhtuyev G.V., Strygin A.I., e. a.** [Geologiya krivorozhskih zhelezorudnyh mestorozhdeniy (in Russian)] *Geology of Krivoy Rog iron ore deposits // Kiev: Publishing House of the UkrSSR Academy of Sciences*, 1962.– V. 1 – 484 p, V. 2 – 567 p.

4. **Євтєхов В.Д.** Етапи формування комплексної мінерально-сировинної бази залізорудних родовищ Криворізько-Кременчуцького лінеamentу // *Відомості Академії гірничих наук України.*– 1997.– № 4.– С. 111-114.

4. **Evtekhov V.D.** [Etapy formuvannya kompleksnoї mineralno-syrovynnoї bazy zalizorudnyh rodovyshch Kryvorizko-Kremenchutskogo lineamentu (in Ukrainian)] *Stages of complex mineral base formation of iron ore deposits of Kryvyi Rih-Kremenchuk lineament // Proceedings of the Academy of Mining Sciences of Ukraine.*– 1997.– № 4.– P. 111-114.

5. **Каниболоцкий П.М.** Петрогенезис

пород и руд Криворожского железорудного бассейна // Черновцы: Изд. АН УССР, 1946.– 312 с.

5. **Kanibolotskyi P.M.** [Petrogenesis porod i rud Krivorozhskogo zhelezorudnogo basseina (in Russian)] Petrogenesis of rocks and ores of Krivoy Rog iron ore basin // Chernivtsi: Publishing House of the UkrSSR Academy of Sciences, 1946.– 312 p.

6. **Свитальский Н.И., Фукс Э.К., Половинкина Ю.Ир. и др.** Железорудное месторождение Кривого Рога.– Москва-Ленинград: Госгеолиздат, 1932.– 284 с.

6. **Svitalskiy N.I., Fuks E.K., Polovinkina Yu.Ir., e. a.** [Zhelezorudnoye mestorozhdeniye Krivogo Roga (in Russian)] Iron ore deposit of Krivoy Rog // Moscow-Leningrad: Gosgeolizdat, 1932.– 284 p.

ЄВТЕХОВ В.Д., ДЕМЧЕНКО О.С., ЄВТЕХОВ Є.В., ФІЛЕНКО В.В., СМІРНОВ О.Я., ТІХЛИВЕЦЬ С.В., ПРИЛЕПА Д.М., БЕРЕЗА Д.В., ГЕОРГІЄВА О.П. Технологічна мінералогія підвищення якості багатих залізних руд Криворізького басейну.

Резюме. Визначення гранулометричного, мінерального, хімічного складу проводилось для матеріалу двох проб гематитової руди шахти ім. В.І.Леніна та продуктів їх сухої магнітної сепарації. Проба 1 представляла проміжний продукт збагачення видобутої з надр рудної маси з крупністю частинок 80-0 мм і вмістом заліза 54,19 мас.%; проба 2 – товарну агломераційну руду з крупністю частинок 16-0 мм і вмістом заліза 55,33 мас.%. Матеріал обох проб мав практично бімінеральний склад: кварц + гематит. Реліктовий магнетит був присутнім у незначній кількості: близько 2 об'ємн.% у складі рудних частинок, біля 5% у складі зростків і близько 0,2% в складі нерудних частинок. Інші мінерали (дисперсний гематит, силікати, карбонати) були представлені в мінімальній кількості (кожен не більше 0,5 об'ємн.%). Матеріал обох проб повторно збагачувався з використанням додроблення, грохотіння й сухої магнітної сепарації. Одержані результати привели до висновку, що з дослідженого рудного матеріалу можливе виробництво товарної агломераційної руди з вмістом заліза не нижче 60 мас.% і крупністю частинок від 10-0 до 5-0 мм; вихід цього продукту можна прогнозувати на рівні 65-75% від маси вихідного матеріалу.

Ключові слова: залізисто-кремниста формація, Криворізький басейн, багаті залізні руди, мінералогія руд, підвищення якості агломераційної руди.

ЕВТЕХОВ В.Д., ДЕМЧЕНКО О.С., ЕВТЕХОВ Е.В., ФИЛЕНКО В.В., СМІРНОВ А.Я., ТИХЛИВЕЦ С.В., ПРИЛЕПА Д.Н., БЕРЕЗА Д.В., ГЕОРГИЕВА Е.П. Технологическая минералогия повышения качества богатых железных руд Криворожского бассейна.

Резюме. Определение гранулометрического, минерального, химического состава проводилось для материала двух проб гематитовой руды шахты им. В.И.Ленина и продуктов их сухой магнитной сепарации. Проба 1 представляла промежуточный продукт обогащения добытой из недр рудной массы с крупностью частиц 80-0 мм и содержанием железа 54,19 мас.%; проба 2 – товарную агломерационную руду с крупностью частиц 16-0 мм и содержанием железа 55,33 мас.%. Материал обеих проб имел практически биминеральный состав: кварц + гематит. Реликтовый магнетит присутствовал в незначительном количестве: около 2 объемн.% в составе рудных частиц; около 5% в составе сростков и около 0,2% в составе нерудных частиц. Другие минералы (дисперсный гематит, силикаты, карбонаты) были представлены в минимальном количестве (каждый не более 0,5 объемн.%). Материал обеих проб повторно обогащался с использованием додрабывания, грохочения и сухой магнитной сепарации. Полученные результаты привели к заключению, что из изученного рудного материала возможно производство товарной агломерационной руды с содержанием железа не ниже 60 мас.% и крупностью частиц от 10-0

до 5-0 мм; выход этого продукта можно прогнозировать на уровне 65-75% от массы исходного материала.

Ключевые слова: железисто-кремнистая формация, Криворожский бассейн, богатые железные руды, минералогия руд, повышение качества агломерационной руды.

EVTEKHOV V.D., DEMCHENKO O.S., EVTEKHOV E.V., FILENKO V.V., SMIRNOV A.Ya., TIHLIVETS S.V., PRYLEPA D.N., BEREZA D.V., GEORGIIEVA O.P. Technological mineralogy for improving the quality of high-grade iron ores of Kryvyi Rih basin.

Summary. Granulometric, mineralogical and chemical studies of two samples of hematite ore from V.I.Lenin Mine and products of their dry magnetic separation have been conducted. The Sample 1 represented middlings of ore mass of 80-0 mm particle size and total iron content of 54.19 mass.%; the Sample 2 represented sinter ore with particle size of 16-0 mm and total iron content of 55.33 mass.%.

The material of both samples was of virtually biminerall composition (quartz + hematite). Depending on peculiarities of the particles (ore (hematite) particles, intermediate composition particles (hematite + quartz), non-ore particles (quartz), the contents of both hematite and quartz in their composition varied from 0 up to 100 vol.%. Relict magnetite was presented in small amounts: about 2 vol.% in the ore particles, about 5 vol.% in the intermediate composition particles and about 0.2% in non-ore particles. Other mineral components (dispersed hematite, silicates, carbonates) are represented in the ores in a minimum amount (each no more than 0.5 vol.%).

Two products were subtracted from the Sample 1: Product 1 represented fine-grained grading of the Sample 1 (particle size of 0-10 mm) and Product 2, obtained by coarse-grained (10-80 mm) grading recrushing of Samples 1 to the size of 0-10 mm. Sample 2 in the process of technological test was studied as the Product 3.

The aim of mineralogical studies and technological tests was to determine the possibility of raising iron content in the sinter ore from 54-55 to 60-61 mass.%. The material of all three products was subjected to concentration using the methods of dry magnetic separation and screening. The following results were obtained.

Product 1 iron content (approximately 61 mass.%) was consistent with the requirements for high-quality sinter-ore (iron content more than 60 mass.% of iron). Iron content in its composition was increased to 62-63 mass.% by dry magnetic separation method; the yield of the product was more than 90%. The need for such reparation needs to be defined according to the data of cost estimates.

We failed to obtain the final product of specified quality from the Product 2. But it is possible to obtain marketable sinter ore with iron content of not less than 60 mass.% and a yield of 25-30% of the total weight of the initial Product 2 from fine-grained (0-5 mm) fraction of the product by selecting the optimal mode of dry magnetic separation.

It is feasibly to produce a final product with iron content of not less than 60 mass. % and a yield of about 53% from Product 3 by dry magnetic separation method. An increase in the yield of sinter ore of required quality up to 75-80% can be obtained by selecting the mode of dry magnetic separation and combining it with screening.

Introduction of the results of mineralogical studies and technological tests will help to maintain the competitiveness of the sinter ore from Kryvyi Rih basin in the global iron ore market.

Key words: banded iron formation, Kryvyi Rih basin, high-grade iron ores, mineralogy of ores, improving the quality of sinter ore.

*Надійшла до редакції 10 квітня 2015 р.
Представив до публікації проф. Б.І.Пирогов.*