

УДК 549 : 622.7 : 669.181.28 (477.63)

Евтехов В.Д., Филенко В.В., Тихливец С.В., Демченко О.С.

МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ И ОБОГАТИМОСТЬ МЕЛКОЗЕРНИСТОЙ ФРАКЦИИ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ШЛАКА ЕНАКИЕВСКОГО МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ЗАВОДА

Минералогически обоснована оптимальная технология производства высококачественного железорудного концентрата из одного из промежуточных продуктов переработки сталеплавильного шлака.

Шлаки металлургических заводов Украины на протяжении последних около двадцати лет используются как техногенное железорудное сырье [1, 2], главным образом, для извлечения из них крупнокусковых и среднекусковых включений металлического железа (скрапа). Основными технологическими операциями при этом являются гранулометрическое разделение (грохочение) исходного шлака на 3-4 фракции и извлечение из материала фракций -400+250 мм, 250-60 мм и 60-20 (10) мм металла методом «сухой» магнитной сепарации. Установки по извлечению скрапа работают на Криворожском, Донецком, Енакиевском, Алчевском и других металлургических заводах и комбинатах, комбинате «Днепрспецсталь».

Материал фракции -20 (-10) мм на этих установках обычно не подвергается обогащению, поскольку производимый при этом полезный конечный продукт до последнего времени не находил применения, главным образом, по причине его мелкозернистости. Мелкие (преимущественно, менее 10 мм) включения металлического железа и других железо-содержащих минералов (вюстит, магнетит, магхемит, гематит, гетит, лепидокрокит и др.) в значительном количестве присутствуют также в составе немагнитного материала указанных выше крупнозернистых фракций.

Авторы изучали минеральный состав и обогатимость отходов действующих в настоящее время обогатительных установок с целью минералогического обоснования возможности эффективного обогащения не используемых фракций шлаков и тем самым повышения степени утилизации шлаков, снижения объемов складирования металлургических отходов, обеспечения производства дополнительного количества высококачественного металлургического сырья. При выполнении настоящей работы изучалась возможность производства полиминерального железорудного концентрата из мелкозернистого отсева действующих обогатительных установок на примере Енакиевского металлургического завода.

Для проведения минералого-технологических исследований использовался мелкозернистый отсев магнитной фракции действующей обогатительной установки. Крупность частиц составляла 10-0 мм. По данным химического анализа, общее содержание железа в составе материала исходной пробы составляло 40,2 мас.%. Повышенное значение этого показателя по сравнению с соответствующим параметром мелкозернистой фракции рядовых шлаков сталеплавильного производства (15-20 мас.%) объясняется тем, что изученный материал в заводских условиях подвергался «сухой» магнитной сепарации совместно с материалом крупнозернистых фракций. Для выполнения исследований была направлена магнитная составляющая мелкозернистой фракции шлака. Такой материал называется «шлак обогащенный» (ШО). В ограниченном количестве он напрямую используется в аглодоменном производстве, но преобладающая его часть возвращается в шлаковые отвалы металлургических заводов.

По данным количественных минералогических подсчетов в прозрачных и полированных шлифах, средний минеральный состав материала исходной пробы был следующий (в пересчете на массовые %): железо металлическое 30,7; вюстит 0,6; магнетит 5,4; магхемит 1,8; гематит 2,2; гетит 3,6; другие железо-содержащие минеральные фазы (лепидокрокит, дисперсный гетит, ферриты кальция и магния и др.) 0,9; нерудные компоненты (силикатное стекло, силикаты, графит и др.) 54,8. На рис. 1 показаны особенности минерального состава и морфологии рудных и нерудных компонентов изученного материала.

Около 20% рудной составляющей присутствует в составе изученного материала в виде мономинеральных (раскрытых) частиц, около 80% рудных минералов ШО представлены сростками с нерудными компонентами (силикатным стеклом, силикатами, карбонатами). Для их раскрытия необходимо дробление или даже измельчение ШО. Гранулометрическое изучение рудных включений в составе шлака показало, что частицы металлического железа имеют размер, преимущественно, более 1 мм; частицы оксидов, гидроксидов и других соединений железа – обычно менее 1 мм.

Подготовка исходного материала к обогащению (рудоподготовка)

Рудоподготовка ШО состояла из двух операций: 1) дробления исходного материала и 2) грохочения продуктов дробления. Необходимость дробления была обусловлена тем, что, как отмечалось выше, 80% частиц рудных минералов в составе ШО находится в составе сростков с нерудными компонентами шлака. Исходный материал дробился до крупности частиц менее 1 мм, что было определено приведенными выше результатами изучения размера рудных частиц.

Продукты дробления подвергались грохочению с помощью сита с размером отверстий 1 мм. Надрешетный продукт (крупность -10+1 мм) представлял собой смесь трех видов частиц: 1) практически полностью

раскрытых частиц металлического железа; 2) нерудных частиц с очень низким содержанием (не более 3-5 объемн.%) рудных минералов; 3) сростков металлического железа и нерудных компонентов. Этот продукт дробления направлялся на «сухую» магнитную сепарацию.

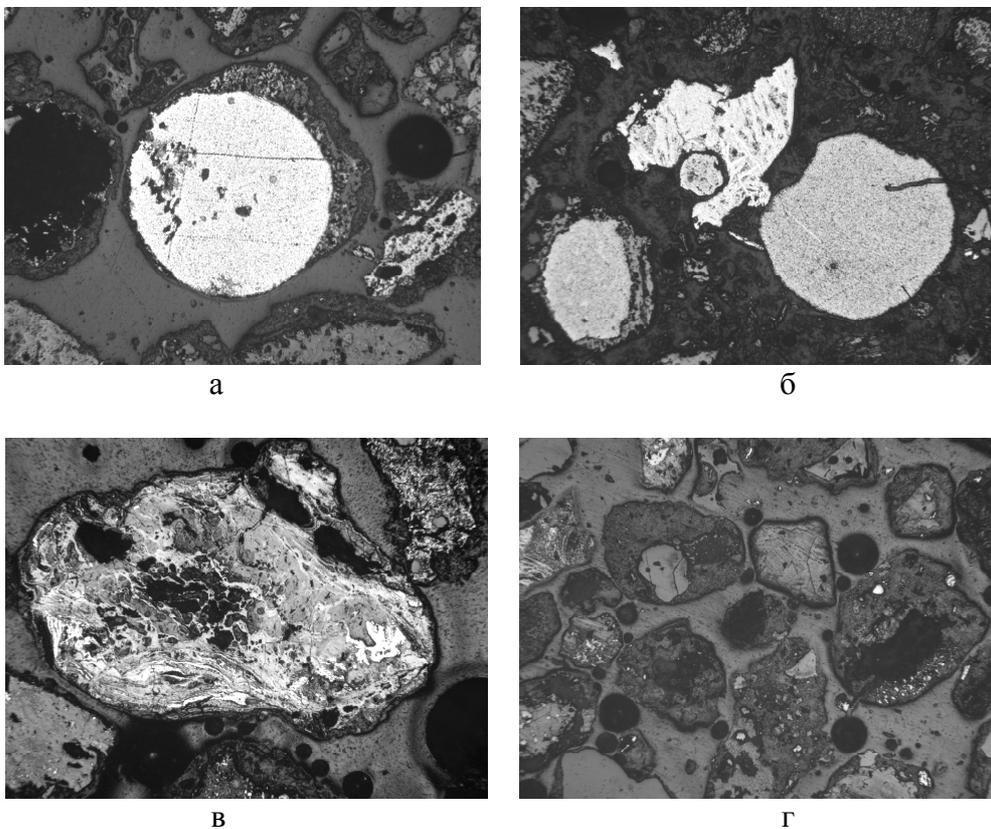


Рис. 1. Минеральный состав и морфологические особенности рудных и нерудных компонентов изученного материала (ШО).

а – сферическая частица металлического железа (белое), справа ксеноморфное выделение магнетита (светлосерое); темносерое – силикатное стекло;

б – ксеноморфная частица металлического железа (белое) и сферические выделения магнетита (светлосерое); темносерое – силикатное стекло;

в – колломорфный агрегат гематита (серое) с реликтовыми включениями металлического железа (белое); частицы темносерого цвета – силикатное стекло;

г – частицы силикатного стекла (темносерое) с мелкими ксеноморфными включениями магнетита (светлосерое) и металлического железа (белое).

Отраженный свет; без анализатора; увеличение 35^x.

Подрешетный продукт, состоящий из раскрытых частиц рудных и нерудных компонентов, а также сростков с разным содержанием рудного материала, направлялся на обогащение с использованием разных

технологий – «сухой», «мокрой» магнитной сепарации и «сухой», «мокрой» гравитационной сепарации.

Минеральный состав и обогатимость крупнозернистого продукта дробления ШО

Материал с крупностью частиц 10-1 мм подвергался обогащению методом «сухой» магнитной сепарации с помощью лабораторного магнитного анализатора научно-производственного предприятия «Продэкология» (г. Ровно). Интенсивность магнитного поля подбиралась эмпирически. Общее содержание железа в магнитном продукте составило 68,9 мас.%. Микроскопическое изучение магнитного продукта показало, что частицы в его составе были представлены металлическим железом и сростками металлического железа с нерудными компонентами. Подчиненную роль в составе сростков играли оксиды железа – гетит, магнетит, гематит.

Для повышения общего содержания железа в составе конечного полезного продукта было проведено дораскрытие сростков с последующей «сухой» магнитной сепарацией полученного продукта. Дораскрытие проводилось с помощью лабораторной шаровой мельницы без использования воды. В составе полученного после магнитной сепарации концентрата 1 преобладало металлическое железо, в значительно меньшем количестве присутствовали магнетит, гематит, гетит (рис. 2) и силикатный материал (главным образом, силикатное стекло). Общее содержание железа в составе концентрата 1 очень высокое – 91,3 мас.%. Выход его составил 28,6%. Порядок выполнения экспериментов по обогащению крупнозернистого продукта дробления ШО, качество и выходы полученных продуктов показаны на левых ветвях технологических схем, приведенных на рис. 2-5.

Минеральный состав и обогатимость мелкозернистого продукта дробления ШО

Материал с крупностью частиц менее 1 мм, как показано на рис. 2-5, характеризовался относительно высоким содержанием железа (22,7 мас.%) и высоким выходом (55,5%). В связи с этим были проведены технологические эксперименты с целью извлечения из него железосодержащих минералов. Эксперименты проводились четырьмя методами: «сухой», «мокрой» магнитной сепарации и «сухой», «мокрой» гравитационной сепарации.

«Сухая» магнитная сепарация этого продукта проводилась с помощью лабораторного магнитного анализатора научно-производственного предприятия «Продэкология» (г. Ровно). Интенсивность магнитного поля подбиралась эмпирически. Были получены магнитный и немагнитный продукты (рис. 2, правая ветвь технологической схемы). Общее содержание железа в магнитном продукте (концентрат 2) составило 51,1 мас.%, выход его – 19,8%.

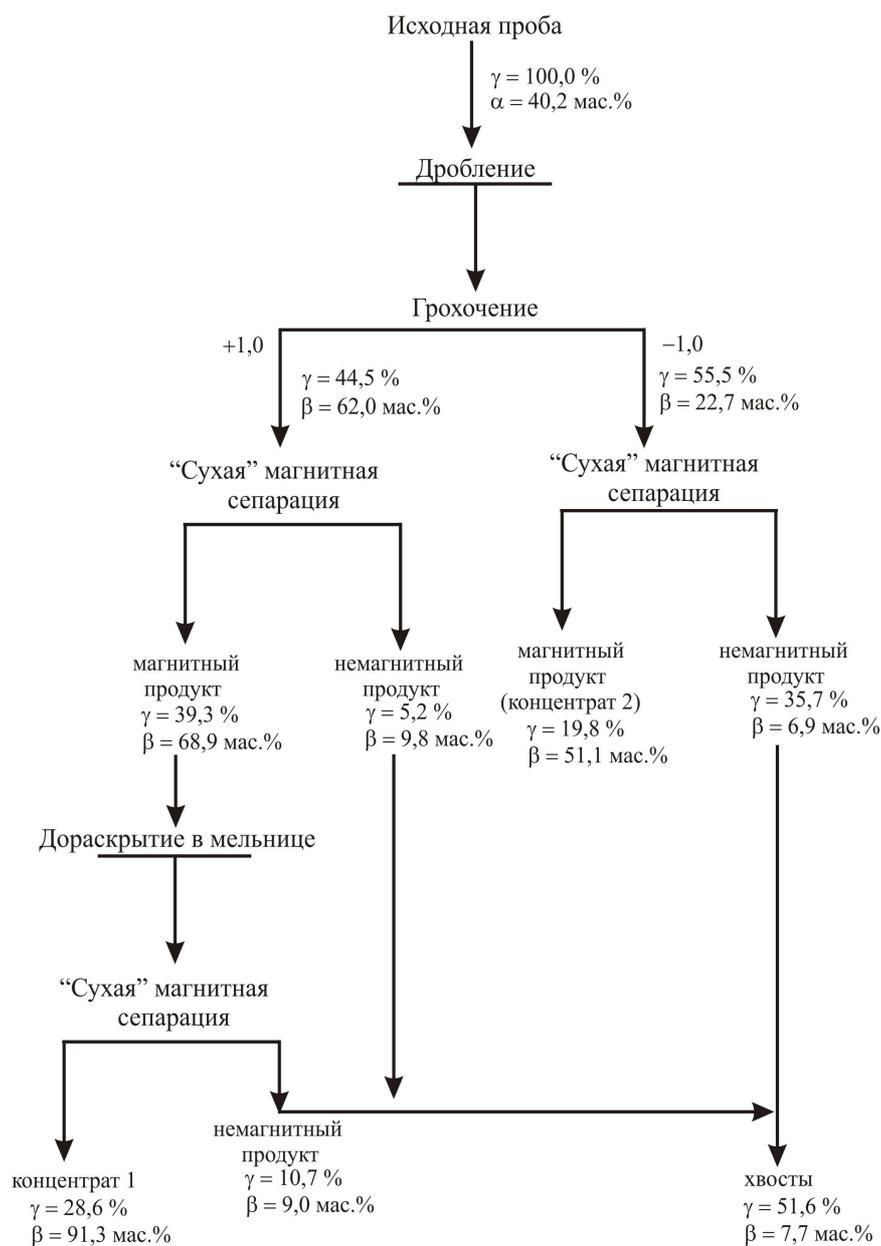


Рис. 2. Технологическая схема обогащения ШО с использованием «сухой» магнитной сепарации.

По результатам минералогического изучения магнитного и немагнитного продуктов, в составе концентрата 2 присутствовали как раскрытые частицы металлического железа, магнетита, гематита (мартита), гетита, так и сростки этих минералов с силикатным стеклом и силикатами. Содержание раскрытых нерудных частиц, представленных, главным образом, силикатным стеклом, по данным разных опытов, колеба-

лось от 6 до 12 мас.%, в среднем для экспериментов этой серии составило 8,7 мас.%

Относительно низкое содержание железа в составе магнитного продукта, по данным микроскопических исследований, объясняется захватом в него большого количества силикатного материала – как в виде сростков с рудными минералами, так и в виде самостоятельных частиц. Вовлечение последних в состав магнитного продукта связано с интенсивной флокуляцией железо-содержащих частиц в магнитном поле.

Содержание железа в немагнитном продукте низкое – 6,9 мас.%, выход его – 35,7%. Железо здесь присутствовало в виде очень мелких включений металла, магнетита, гематита, гетита в составе частиц шлака и силикатного стекла (рис. 1г). В небольшом количестве (по данным разных опытов этой серии, от 0,7 до 1,5 мас.%) присутствовали также раскрытые частицы гидроксидов (гетит, лепидокрокит) и оксидов (гематит, магнетит, вюстит) железа.

При проведении опытов методом **«мокрой» магнитной сепарации** использовался лабораторный магнитный анализатор с изменяющейся напряженностью магнитного поля, значения которой подбирались эмпирически. В результате экспериментов были получены магнитный (концентрат 2) и немагнитный продукты (рис. 3).

Общее содержание железа в магнитном продукте составило 61,7 мас.%, выход его – 12,4%. Более высокое содержание железа в составе магнитного продукта «мокрой» магнитной сепарации по сравнению с аналогичным продуктом «сухой» сепарации объясняется слабее проявляющимся эффектом флокуляции частиц в водной среде.

Преобладающим рудным компонентом магнитного продукта являлось металлическое железо. Оно присутствовало в виде цельнометаллических и полых сфероидов (рис. 1а), частиц неправильной формы, а также в виде мелких округлых или неправильной формы включений в нерудных частицах, представленных шлаком и силикатным стеклом (рис. 1г). Изредка встречались частицы металлического железа, замещенные с периферии магнетитом, гематитом, гетитом. Вторым по распространенности рудным минералом магнитного продукта являлся гетит, который формировался в процессе выветривания шлака, замещая металлическое железо и магнетит. Гетит был представлен скрытокристаллическими, концентрически-скорлуповатыми, реже землистыми агрегатами. Как правило, в составе агрегатов гетита присутствовали включения металлического железа или магнетита, благодаря чему эти частицы были вовлечены в состав магнитного продукта.

Содержание железа в отходах «мокрой» магнитной сепарации мелкозернистого продукта составило 11,5 мас.%, что несколько выше соответствующего показателя «сухой» магнитной сепарации. Состав и строение частиц немагнитных продуктов, полученных обоими магнитными методами, аналогичны.

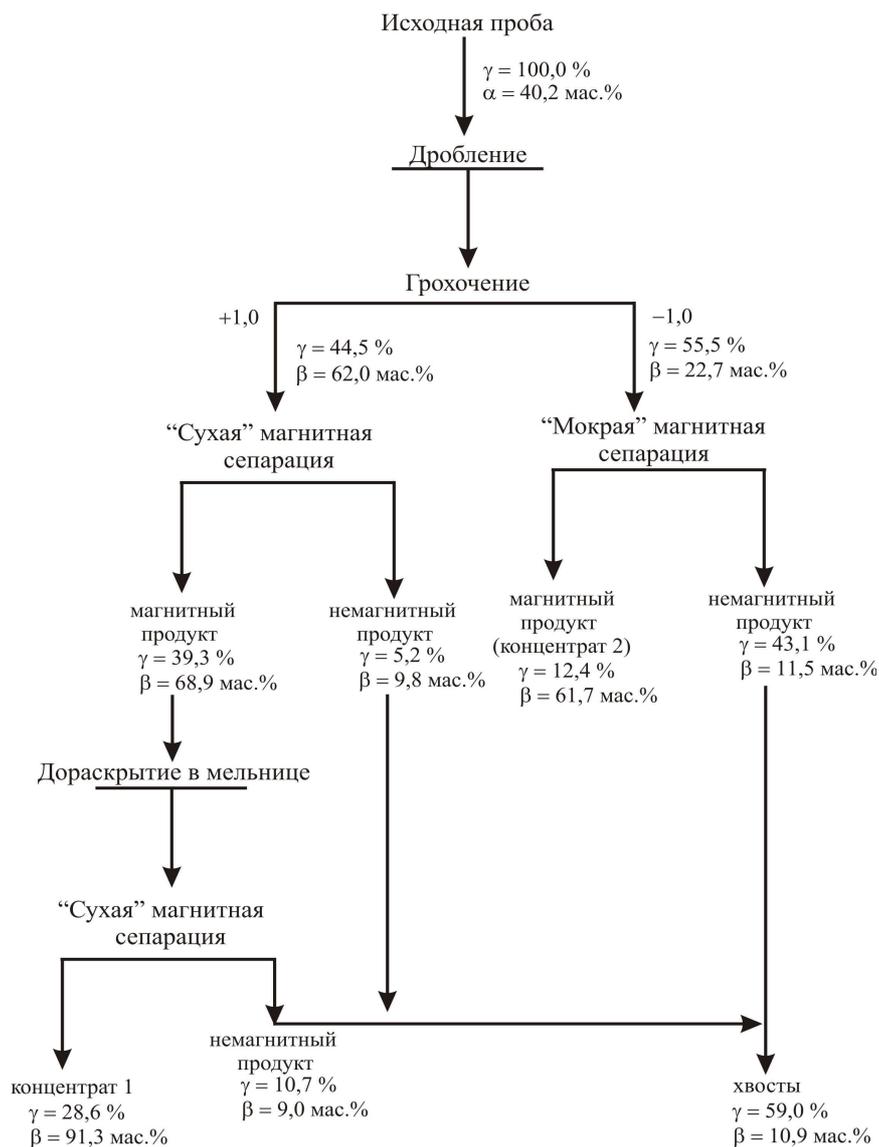


Рис. 3. Технологическая схема обогащения ШО с использованием «сухой» и «мокрой» магнитной сепарации.

Эксперименты методом «сухой» гравитационной сепарации проводилась с помощью лабораторной установки воздушной классификации пылевидного материала. Промышленные аналоги таких установок используются для производства концентратов талька, асбеста, мусковита и других полезных ископаемых. Режимы воздушной сепарации подбирались экспериментальным путем. Технологическая схема эксперимента показана на рис. 4. Общее содержание железа в полученном полезном конечном продукте оказалось невысоким и составило 55,2 мас.%, выход его – 12,0%.

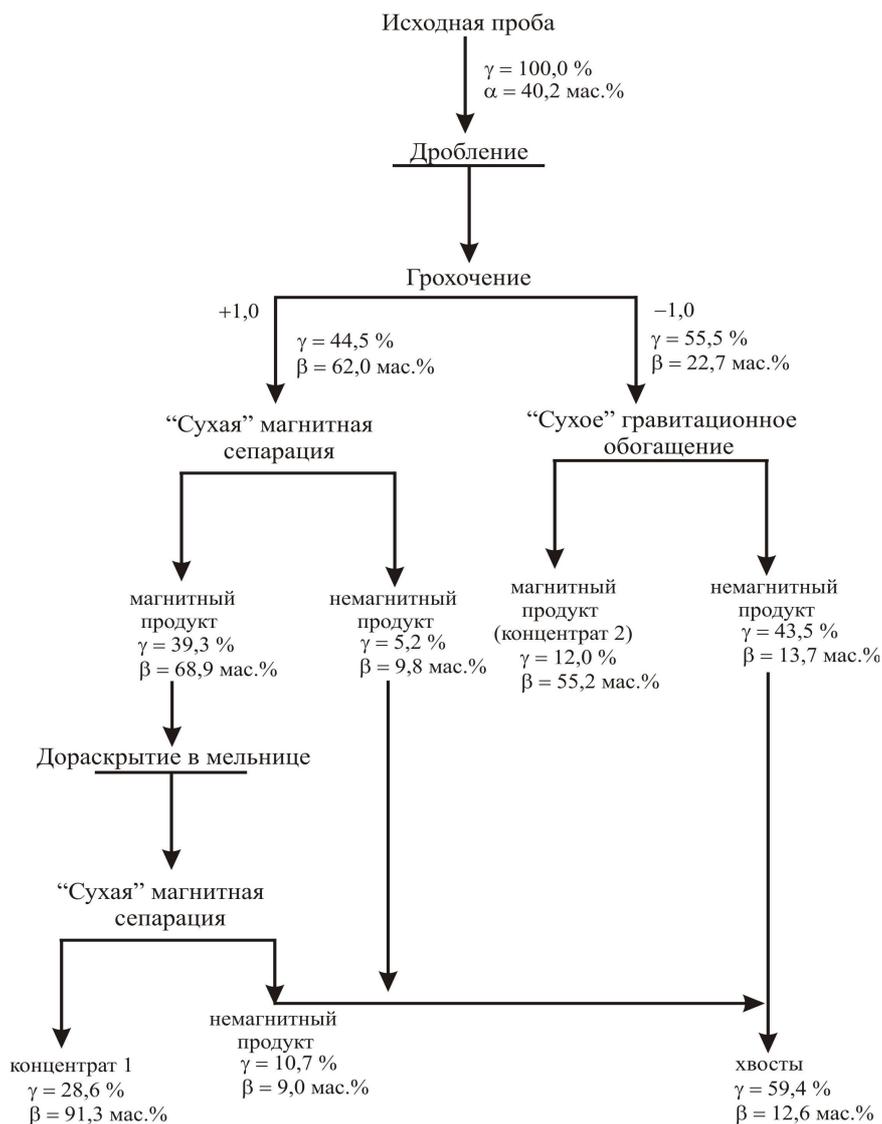


Рис. 4. Технологическая схема обогащения ШО с использованием «сухой» магнитной и «сухой» гравитационной сепарации.

По результатам минералогического изучения концентрата, низкое содержание железа в его составе связано с недостаточно эффективным разделением рудных и нерудных частиц в процессе воздушной сепарации. В составе концентрата кроме частиц металлического железа, магнетита и гетита присутствовали также частицы шлака, силикатного стекла и частицы смешанного рудно-силикатного состава. Содержание железа в отходах обогащения было повышенным, в среднем составило 13,7 мас. %.

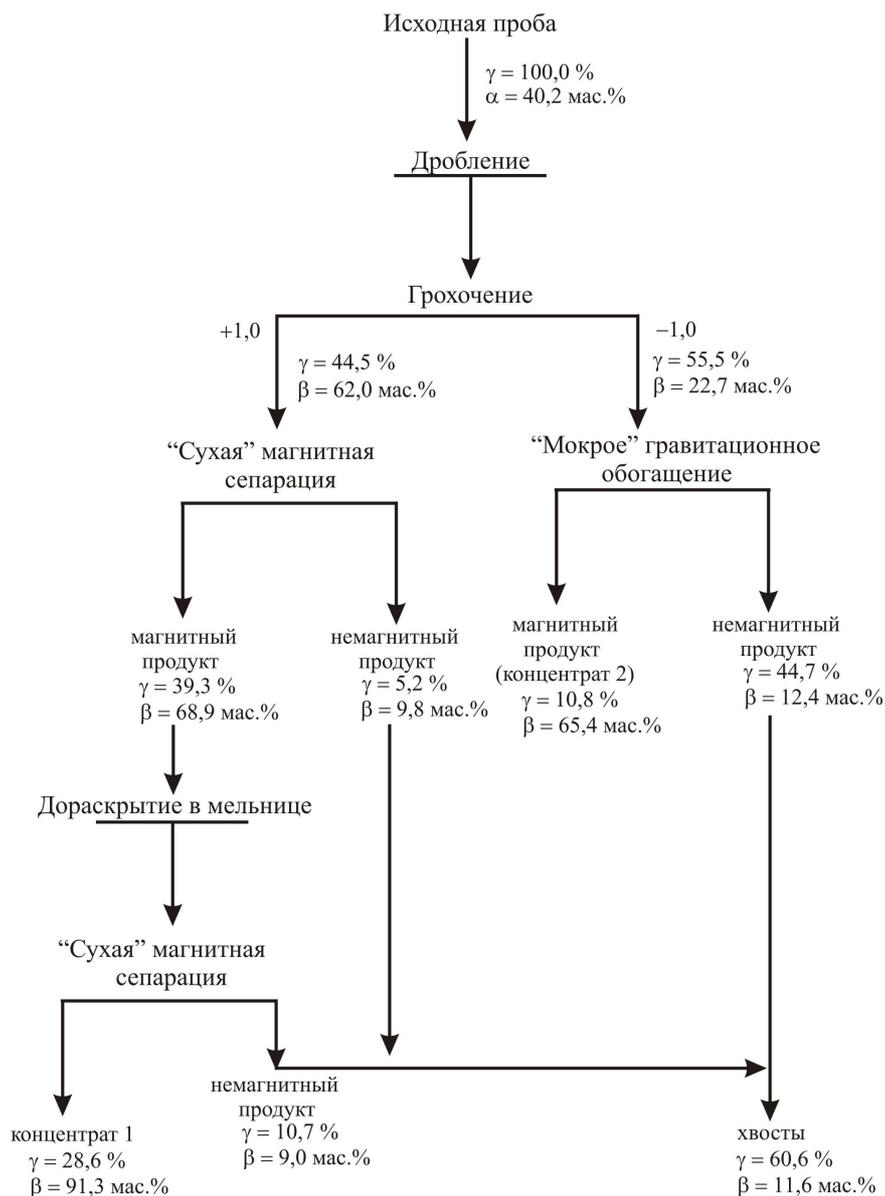


Рис. 5. Технологическая схема обогащения ШО с использованием «сухой» магнитной и «мокрой» гравитационной сепарации.

«Мокрая» гравитационная сепарация мелкозернистой фракции ШО проводилась с помощью лабораторного концентрационного стола с эмпирически подобранным режимом работы деки. В промышленных условиях для «мокрой» гравитационной сепарации могут использоваться винтовые, конусные сепараторы, промышленные концентрационные столы. Технологическая схема обогащения показана на рис. 5.

Общее содержание железа в полученном полезном конечном продукте достаточно высокое – 65,4 мас.%, выход его – 10,8%. По резуль-

татам минералогического изучения полученных продуктов, «мокрое» гравитационное обогащение обеспечило наиболее высокую степень разделения рудных и нерудных частиц. Концентрат характеризуется преобладанием металлического железа, магнетита и гетита; содержание частиц шлака и силикатного стекла невелико.

Отходы «мокрого» гравитационного обогащения материала мелкозернистой фракции ШО характеризуются относительно невысоким содержанием железа (12,4 мас.%). По минеральному составу и строению частиц они близки к отходам магнитной сепарации.

В соответствии с результатами четырех серий экспериментов, метод «мокрого» гравитационного обогащения, по мнению авторов, можно рекомендовать для производства высококачественного железорудного продукта из материала мелкозернистой фракции ШО.

Выводы

1. Был изучен продукт предварительного обогащения сталеплавильного шлака Енакиевского металлургического завода, производимый методом «сухой» магнитной сепарации из материала мелкозернистой (10-0 мм) фракции шлака и именуемый «шлак обогащенный» (ШО). Общее содержание железа в составе этого материала 40,2 мас.%.

2. По результатам микроскопических исследований, в состав ШО входит металлическое железо и оксиды железа – магнетит, гематит (мартит), гетит. Нерудная составляющая ШО представлена пористым шлаковым материалом и силикатным стеклом. Большинство рудных частиц образует сростания с нерудными компонентами шлака – силикатным стеклом, силикатами кальция и др.

3. С целью раскрытия рудных частиц при рудоподготовке исходный материал был подвергнут дроблению с помощью лабораторной щековой дробилки.

4. Продукты дробления были рассеяны на две гранулометрические фракции: -10+1 мм и -1+0 мм. Выбор сита с отверстием 1 мм для разделения продуктов дробления был обоснован по данным минералогических исследований шлака и результатам определения гранулометрического состава частиц рудных минералов.

5. Материал крупнозернистой (10-1 мм) фракции был направлен на «сухую» магнитную сепарацию. В результате был получен магнитный продукт с общим содержанием железа 68,9 мас.%; выход его составил 39,3%. В связи с присутствием в составе этого продукта большого количества сростков металла и нерудных компонентов, было проведено до-раскрытие этого материала методом сухого измельчения в шаровой мельнице. Магнитная сепарация доизмельченного материала позволила получить концентрат с общим содержанием железа 91,3 мас.%. Выход его составил 28,6%.

7. Мелкозернистый материал с крупностью частиц 1-0 мм подвергался обогащению с использованием четырех технологических схем:

«сухой», «мокрой» магнитной сепарации и «сухой», «мокрой» гравитационной сепарации. Полезный конечный продукт наиболее высокого качества был получен методом «мокрой» гравитационной сепарации. Общее содержание железа в его составе 65,4 мас.%; выход этого продукта 10,8%.

8. Таким образом, обогащение ШО можно производить с использованием двух технологических линий:

– линия 1, основными узлами которой являются дробление частиц ШО крупностью 10-1 мм, дораскрытие их в мельнице, «сухая» магнитная сепарация с производством концентрата с общим содержанием железа более 90 мас.% и выходом около 30%;

– линия 2, основной узел которой – «мокрая» гравитационная сепарация мелкозернистого (1-0 мм) материала ШО с производством концентрата рядового качества: общее содержание железа в его составе около 65 мас.%, выход около 10%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Губіна В.Г., Горлицький Б.О. Залізовмісні відходи України: стан і перспективи використання // Київ: Логос, 2010.– 128 с.

2. Іванченко В.В., Тиришкіна С.М., Оторвін П.І. Сталеплавильний шлак в сучасному геологічному середовищі // Київ: Вид. Відділення морської геології та осадового рудоутворення НАН України, 2011.– 148 с.

ЄВТЕХОВ В.Д., ФІЛЕНКО В.В., ТІХЛИВЕЦЬ С.В., ДЕМЧЕНКО О.С. **Мінеральний склад і збагачуваність дрібнозернистої фракції сталеплавильного шлаку Єнакієвського металургійного заводу.**

РЕЗЮМЕ. Досліджений матеріал являв собою дрібнозернисту (10-0 мм) фракцію шлаку збагаченого (ШО), який виробляється в результаті вторинної переробки сталеплавильного шлаку. Через низький вміст заліза (близько 40 мас.%) і дрібнозернистість цей матеріал практично не знаходить застосування в аглодоменному процесі. Були проведені мінералогічні дослідження й чотири серії технологічних експериментів з використанням «сухої», «мокрої» магнітної сепарації та «сухої», «мокрої» гравітаційної сепарації. Результати дослідів показали, що за оптимальної комбінації технологічних схем можливе виробництво з дрібнозернистої фракції ШО двох корисних продуктів: 1) концентрату 1 із загальним вмістом заліза 90-91 мас.% і виходом близько 30%; 2) концентрату 2 із загальним вмістом заліза близько 65 мас.% і виходом близько 10%.

Ключові слова: відходи сталеплавильного виробництва, шлак, мінеральний склад, збагачуваність, залізорудний концентрат.

ЄВТЕХОВ В.Д., ФІЛЕНКО В.В., ТІХЛИВЕЦЬ С.В., ДЕМЧЕНКО О.С. **Минеральный состав и обогатимость мелкозернистой фракции сталеплавильного шлака Енакиевского металлургического завода.**

РЕЗЮМЕ. Изученный материал представлял собой мелкозернистую (10-0 мм) фракцию шлака обогащенного (ШО), получаемого в

результате вторичной переработки сталеплавильного шлака. Вследствие низкого содержания железа (около 40 мас.%) и мелкозернистости этот материал практически не находит применения в аглодомном процессе. Были проведены минералогические исследования и четыре серии технологических экспериментов с использованием «сухой», «мокрой» магнитной сепарации и «сухой», «мокрой» гравитационной сепарации. Результаты испытаний показали, что при оптимальной комбинации технологических схем возможно производство из мелкозернистой фракции ШО двух полезных продуктов: 1) концентрата 1 с общим содержанием железа 90-91 мас.% и выходом около 30%; 2) концентрата 2 с общим содержанием железа около 65 мас.% и выходом около 10%.

Ключевые слова: отходы сталеплавильного производства, шлак, минеральный состав, обогатимость, железорудный концентрат.

EVTEKHOV V.D., FILENKO V.V., TIKHLIVETS S.V., DEMCHENKO O.S. Mineral composition and dressability of fine-grained fraction of steelmaking slag from Enakievo steelmaking plant.

SUMMARY. *The material studied involved fine-grained (10-0 mm) fraction of dressed slag, obtained as the result of steelmaking slag reprocessing. This material is not practically used in sinter-blast-furnace practice because of low iron content (about 40 mass.%) and its fine-grained texture. Mineralogical studies and four series of technological experiments with the use of “dry”, “wet” magnetic separation and “dry”, “wet” gravitational separation have been carried out. The results of the tests showed possible production of two useful products from fine-grained fraction at optimal combination of process flow sheet: 1) concentrate 1 having total iron content 90-91 mas.% and about 30% of yield; 2) concentrate 2 having total iron content about 65 mas.% and 10% of yield.*

Key words: *steelmaking wastes, slag, mineral content, dressability, iron ore concentrate.*

*Надійшла до редакції 27 червня 2011 р.
Представив до публікації професор Б.І.Пирогов.*