

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ОБЖИГА МЕЛКИХ ФРАКЦИЙ СИДЕРИТА ВОВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ

В.И. Матюхин, С.Г. Меламуд, В.В. Шацлло,
О.В. Матюхин, А.В. Матюхина

ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
(г. Екатеринбург, Россия)

Для более глубокого использования железных руд Бакальского рудоуправления было предложено обжигать их во вращающейся печи в присутствии добавок твердого топлива. Исследования особенностей кинетики их тепловой обработки в атмосфере воздуха при скорости нагрева 10 град/мин позволили выделить семь технологических стадий: сушки, подогрева, диссоциации карбонатов, окисления ферритов, формирования труднорастворимых силикатов, расплавления, которые сопровождаются изменением их теплового состояния и условий уплотнения.

Исследования изменений линейных размеров сидеритовых образцов в процессе изоскоростного нагрева позволили установить условия упрочнения их структуры в выделенных стадиях тепловой обработки.

Представлены результаты промышленных испытаний обжига мелкой фракции сидерита класса (10–0) мм во вращающейся печи, отапливаемой природным газом в присутствии добавок кокса. Показана возможность достижения выхода обожженной фракции до 62,07 % при тепловом КПД агрегата 77,27 %.

Ключевые слова: сидерит, кинетика кристаллохимических преобразований, кинетика уплотнения, вращающаяся печь, материальный и тепловой балансы.

For more in-depth use of iron ore Bakal Mining Administration was asked to burn them in a rotary kiln in the presence of solid fuel additives. Studies of the kinetics of their characteristics of heat treatment in air at a heating rate 10grad. / Min possible to identify seven process steps: drying, preheating dissociation of the carbonates, iron oxidation, formation of sparingly soluble silicate melt, accompanied by a change in their state, and the heat sealing conditions.

Studies of changes of linear dimensions siderite samples during heating izoskorostnogo possible to establish the conditions for strengthening their structures in selected stages of heat treatment

The results of industrial test firing fines siderite class (10–0) mm in a rotary kiln, heated with natural gas in the presence of additives coke. The possibility of achieving output burnt fraction to 62.07 % in the thermal efficiency of the unit 77,27 %.

Keywords: siderite, the kinetics of crystal-chemical transformations, kinetics seals, rotary kiln, material and heat balances.

Одним из крупнейших месторождений железных руд на Южном Урале является Бакальское, общие запасы которого достигают 1 млрд т. Рудные компоненты представлены в них преимущественно сидероплезитом и пестомезитом [1]. По существующей технологии переработки железных руд на Бакальском рудоуправлении основным видом товарной продукции является концентрат обожженного сидерита (КОС) для агломерации, получаемый после окислительного обжига кусковой фракции 13–80 мм в шахтной печи, ее магнитной сепарации и дробления до агломерационной крупности 10–0 мм.

Исходный сидерит отличается относительно низким содержанием железа и содержит в качестве пустой породы оксиды кальция и магния. После его окислительного обжига в шахтной печи выход магнитной фракции может достигать до 85 % с содержанием железа 49,8–53,1 %. Наличие немагнитной составляющей, которая образуется вследствие неполного обжига исходных компонентов, снижает эффективность подготовки металлургического сырья, уменьшая выход годного и увеличивая затраты на производство. Если учесть, что в руднике выход кондиционной руды достигает не более 20–40 %, то существующая технология обогащения отличается низким выходом годного (не более 16,6–33,2 %). Основная масса рудных компонентов остается не востребованной промышленностью и складывается, приводя к потере денежных поступлений.

Исследования условий развития основных физико-химических процессов при обжиге сидеритов производили с использованием экспериментальных кривых дифференциальной сканирующей калориметрии мелкодисперсной пробы сидерита (рис. 1) в атмосфере воздуха при скорости нагрева 10 град/мин.

Их анализ позволяет выделить ряд технологических стадий. В процессе тепловой обработки рудный сидерит первоначально подвергается процессам обезвоживания (участок 1) в целях удаления физически связанной влаги, который развивается преимущественно до температуры 77–87 °С. В процессе дальнейшего подъема температуры (участок 2) происходит нагрев материалов, обладающих теплоемкостью 1,654 кДж/(кг·К), с увеличением их физической теплоты вплоть до 500 °С. В этот период их внутренняя структура изменяется слабо с постепенным повышением теплосодержания образцов.

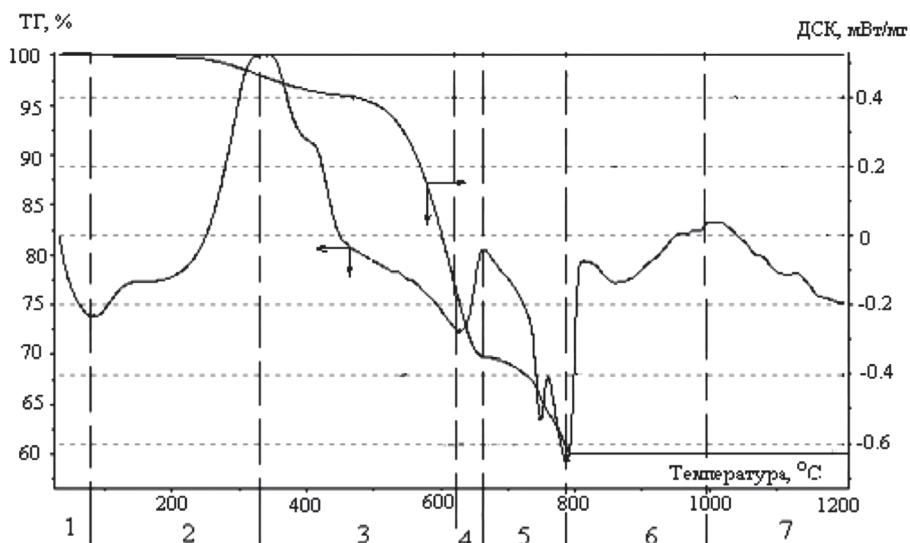


Рис. 1. Дериватограмма процесса тепловой обработки образца сидерита при скорости нагрева 10 град/мин в окислительной среде воздуха. ТГ – термогравиметрическая зависимость; ДСК – дифференциально-сканирующая кривая калориметрии

В интервале температур до 600–640 °С (участок 3) наблюдается развитие процессов диссоциации карбонатов железа, магния и марганца с потерей массы и поглощением тепла (67,11 кДж/кг). Образовавшиеся оксиды вступают между собой в твердофазные реакции с образованием марганец-магнетитовюстита и магномагнетита [2]. При достижения уровня разогрева 600–750 °С в атмосфере воздуха (участок 4) развиваются явления окисления образовавшихся соединений до марганец-магниеферрита и гематита с выделением избыточного тепла. При этом теплосодержание образцов увеличивается.

При более значительных температурах (до 760–800 °С) (участок 5) наблюдаются процессы твердофазного спекания исходных компонентов с формированием труднорастворимых силикатов и понижением их теплосодержания на 168,4 кДж/кг.

Дальнейшее повышение уровня нагрева образцов до 990–1020 °С сопровождается доокислением оксидных форм железа и марганца с образованием разновидностей ферритов (магноферритов) при выделении избыточного тепла (участок 6).

Последующий разогрев образцов сопровождается процессами расплавления исходных компонентов, которые протекают с поглощением тепла (участок 7). Для обогащения рудных материалов по железу этот период целесообразно ограничить, так как при этом происходит оплавление зерен магнетита и пустой породы с образованием прочных конгломератов.

Вопросы улучшения качества обжига дисперсных материалов требуют детального анализа закономерностей развития их упрочнения на основе достижений теории спекания. Рассматривая процесс тепловой обработки дисперсных рудных систем независимо от вида их основы, создание прочных кусков из отдельных частиц можно представить как частный случай спекания дисперсных порошков, осложненного протеканием физико-химических преобразований на границах зерен [3] и сопровождающихся выделением газов. Последовательное повышение температуры тепловой обработки приводит к увеличению количества контактов и при «автономной консолидации» системы [4] формирует внутреннее строение обжигаемых материалов.

На рис. 2 представлена дилатограмма изменения линейных размеров образца, изготовленного из мелкодисперсного сидерита, в процессе непрерывного нагрева его в атмосфере воздуха со скоростью 10 град/мин.

Исследование этих данных позволяет выделить несколько технологических периодов их уплотнения, в течение которых в структуре образцов протекает ряд физико-химических процессов, сопровождающихся внутренними кристаллохимическими преобразованиями, которые согласуются с данными рис. 1. Низкотемпературный период (до 75–80 °С) сушки образцов сопровождается преимущественным сокращением линейных размеров нагреваемых материалов (1-й период).

До температуры около 500 °С (2-й период) получают преимущественное развитие процессы теплового расширения рудной основы, характеризующиеся увеличением линейных размеров обжигаемых материалов.

Термическая диссоциация карбонатов (3-й период) сопровождается выделением из их структуры диоксида углерода, который, изменяя структуру образцов, способствует увеличению объема тела. Однако протекающие од-

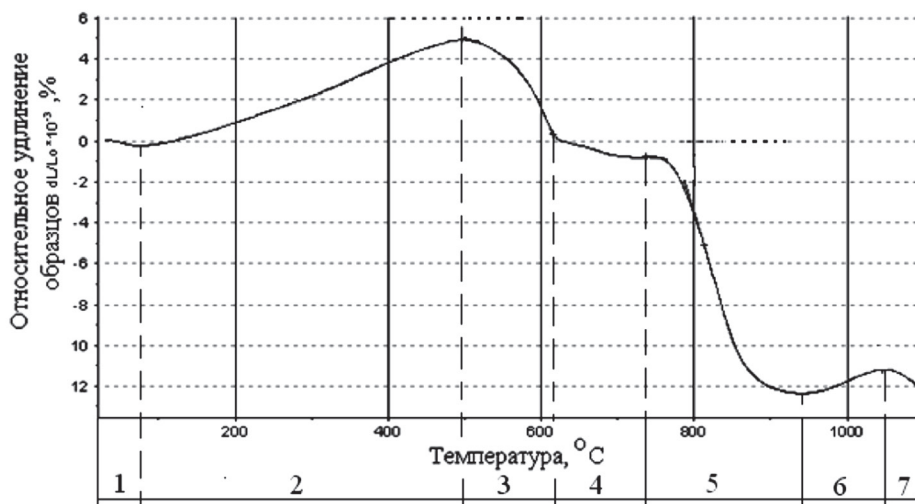


Рис. 2. Изменение линейных размеров образца сидерита в процессе непрерывного нагрева

новременно процессы спекания, обусловленные термической активацией частиц обжигаемых материалов, превышают результаты расширительных явлений и при нагреве образцов до температуры 620 °С их линейные размеры сокращаются, т.е. наблюдаются усадочные явления.

Последующий нагрев материалов до температур около 740 °С (4-й период) сопровождается окислением образовавшейся на предыдущих стадиях закиси железа. Согласно полученным данным, в этот период наблюдается небольшое увеличение линейных размеров испытываемых образцов, по-видимому, связанное с разрыхлением их структуры выделяющимися газами из структуры образцов и изменением параметров кристаллической решетки составляющих кристаллических фаз.

В период твердофазных кристаллохимических преобразований до температуры 940 °С (5-й период) в структуре нагреваемых образцов происходят процессы твердофазного спекания с формированием их более плотной структуры, сопровождающихся усадочными явлениями. При этом следует отметить последовательное развитие двух процессов: до 800 °С образуется магнеоферрит, протекающий с увеличением параметров кристаллической решетки, а при более высоких температурах происходит образование феррита марганца, способствующего уплотнению конечного продукта.

При температурах нагрева материалов до 1020 °С (6-й период) происходит доокисление оксидных фаз ранее образовавшихся соединений железа и марганца с выделением избыточного тепла и газов. При этом формирование по границам зерен жидкой фазы обеспечивает сокращение линейных размеров обжигаемых образцов, а образование в их структуре разрыхляющих газов способствует развитию расширительных явлений. Суммарно этот период характеризуется увеличением объемов нагреваемых материалов. Следует также отметить, что в этот период тепловой обработки сидеритовых образцов улучшаются их магнитные свойства с постепенным увеличением

магнитной восприимчивости, что способствует в последующем улучшению их разделения с пустой породой.

Последующее образование избыточной жидкой фазы в структуре образцов существенно ускоряет усадочные явления, что сопровождается уменьшением их линейных размеров с оплавлением отдельных зерен (7-й период). Процесс спекания порошковых материалов сопровождается, как правило, снижением их пористости за счет последовательного увеличения объема закрытых пор и сокращением объема открытых [4]. При этом искусственные новообразования дисперсных частиц, обладающих высокой удельной поверхностью и значительной поверхностной энергией, по мере повышения температуры способны уплотняться за счет сил диффузии, уменьшая открытую пористость частиц при зарастании отдельных пор за счет перетекания атомов. Скорость этого процесса определяется вязкостью образующегося на поверхности тел расплава и ограничена его подвижностью. Перемещение вещества между частицами происходит как за счет адсорбированных подвижных атомов на границе зерен, так и их подвижности вблизи возникших структурных дефектов. При повышенных температурах подвижность атомов существенно возрастает и между частицами в их контактах возникают перемычки из жидкого расплава, что ускоряет процесс уплотнения образцов за счет объемной диффузии.

Для решения проблем наиболее полного завершения процессов диссоциации карбонатов и доокисления магнетита предложено осуществить процесс обжига мелкой фракции во вращающейся трубчатой печи при совместной подаче в рабочее пространство мелкой фракции сидеритовой руды класса 10–0 мм и кокса класса орешек (менее 20 мм). Простота конструкции этого теплового агрегата и возможность переработки материалов с различным гранулометрическим составом являются привлекательными с точки зрения простоты реализации пирометаллургической стадии производства, а возможность при этом увеличения длительности тепловой обработки обеспечивает завершенность основных физико-химических процессов. Однако низкая интенсивность теплообмена между газами и нагреваемыми материалами вследствие ограниченности поверхности теплообмена, пониженная скорость движения газов в рабочем пространстве вращающейся печи, зональность условий тепловой обработки материалов, высокие эксплуатационные затраты по обслуживанию агрегата, значительные объемы экологических выбросов сдерживают применение вращающейся печи для обжига сидеритовых руд. В основе оценки возможностей использования барабанных печей лежат данные о состоянии и соотношении статей материального и теплового балансов, полученных на основании экспериментальных измерений.

Экспериментальные исследования возможностей обжига мелкой фракции сидеритов класса 10–0 мм производили во вращающейся печи № 3 ОАО «Комбинат «Магнезит» длиной 75 м и внутренним диаметром барабана 3,0 м в присутствии добавок кускового кокса класса +20 мм, отапливаемой при факельном сжигании природного газа. Обожженный продукт охлаждался в отдельном трубчатом холодильнике. Запыленные газы очищались в системе газоочистки, состоящей из осадительной камеры, циклонов и электрофилтра. Основные характеристики ее работы за период испытаний представлены в табл. 1.

Таблица 1

Технологические параметры обжига мелкой фракции сидеритов во вращающейся печи

Параметр	Величина
Расход исходной шихты, кг/ч	17500
Влажность шихты, кг/кг	20,41 %
Средний поток: сидерит, кг/ч	14000
кокс	3500
Средний расход природного газа, м ³ /ч	1000
Температура шихты на входе в печь, °С	24
Температуры материалов на выходе из печи, °С	1150–1204
Температура подсасываемого воздуха из атмосферы, °С	24
Температура отходящих газов в обресе печи, °С	910
Химический состав газов в обресе печи, %:	
CO ₂	17,8
O ₂	1,2
CO	0,1
N ₂	80,9
Запыленность отходящих газов в обресе печи, г/м ³	185
Разрежение в горячей головке, Па	0,5
Выход фракции магнитная/немагнитная, %/ %	85/15

Химический состав исходных рудных компонентов шихты и продуктов обжига представлены в табл. 2.

Таблица 2

Усредненный химический состав исходных рудных компонентов и продуктов обжига

Материал	Химический состав, %			
	Fe _{общ.}	FeO	Fe _{мет.}	ППП
Исходный сидерит	20,55	28,98	0,0	46,04
Обоженная магнитная фракция	50,73	20,28	33,42	14,9
Обоженная немагнитная фракция	4,08	6,35	2,85	66,23

Для определения основных массовых потоков на обжиговой печи был составлен ее материальный баланс (табл. 3).

Таблица 3

Материальный баланс обжига сидеритов во вращающейся печи

Приход массы			Расход массы		
Статья	Количество		Статья	Количество	
	кг/ч	%		кг/ч	%
Расход сидеритов	14000	41,95	Обоженный продукт	8689,66	26,04
Расход кокса	3500	10,49	Отходящие газы	20887,42	62,61
Расход природного газа	215	0,64	Выбросы пыли	3796,80	11,38
Расход воздуха	15658,88	46,92			
Итого приход массы	33373,88	100,00	Итого расход массы	33373,88	100,00

Анализ полученных данных позволяет установить, что в приходной части материального баланса обжиговой печи доля твердых компонентов составляет 17 500 кг/ч или 52,44 %. Доля обожженного продукта при этом составляет всего 26,04 % при его выходе из сидерита только 62,07 %. Обращает на себя внимание существенная доля пылевых выбросов из печи (11,38 %), которые улавливаются в системе газоочистки.

По данным материального баланса был составлен тепловой баланс печи (табл. 4).

Таблица 4

Тепловой баланс вращающейся печи для обжига сидеритов

Приход теплоты			Расход теплоты		
Статья	Количество		Статья	Количество	
	кВт	%		кВт	%
1. Химическая теплота, в т. ч. кокса природного газа	34073,75	96,59	1. Физическая теплота обожженного продукта	3017,18	8,55
	24115,97	68,36			
	9957,78	28,23			
2. Физическая теплота подогретого воздуха	1201,59	3,41	2. Физическая теплота отходящих газов	5471,24	15,51
			3. Физическая теплота пыли	969,34	2,75
			4. Потери теплоты с химическим недожогом	72,4	0,21
			1. Теплота эндотермических реакций	24241,37	68,72
			2. Потери теплоты в окружающую среду	1503,81	4,26
Итого приход теплоты	35275,34	100,0	Итого расход теплоты	35275,34	100,00

Анализ статей теплового баланса показал, что тепловой КПД агрегата при обжиге мелкой фракции сидеритов составляет $8,55 + 68,72 = 77,27$ % благодаря использованию внутреннего источника тепла в виде горящего кокса. При этом основными источниками теплоты во вращающейся печи являются кокс и природный газ, сжигаемые в рабочем пространстве печи. Так как в процессе исследований разделить тепловой эффект экзо- и эндотермических реакций не представлялось возможным, то при составлении теплового баланса определялся их суммарный результат.

Основные тепловые потери на печи связаны с физическим теплом готового продукта (8,55 %), который частично утилизируется в барабанном холодильнике в виде физического тепла подогретого воздуха в количестве 3,41 % с его возвратом в рабочее пространство, а также физическое тепло отходящих газов, утилизация которых может осуществляться с применением теплоэнергетического оборудования. Обращает на себя внимание повышенная доля потерь тепла с пылью. Ее утилизация может быть обеспечена с применением отдельных теплообменников устанавливаемых в осадительной пылевой камере.

Таким образом, проведенные испытания по обжигу мелкой фракции сидеритов во вращающейся печи показали возможность достаточно полного завершения основных физико-химических преобразований в их структуре преимущественно в режиме твердофазного спекания с получением частично металлизированного продукта при его химическом выходе до 62,07 %.

Использование комбинированного топлива в виде добавок кокса в шихту и природного газа при его факельном сжигании обеспечивают высокий тепловой КПД агрегата (77,27 %) с минимальными тепловыми потерями с отходящими газами (15,51 %), химическим недожогом (0,21 %) и в окружающую среду через стенки печи (4,26 %).

Список использованных источников

1. Тимесков В.А. Минералогия карбонатных руд и вмещающих их карбонатных пород Бакальского железорудного месторождения на Южном Урале. – Казань: Казанский университет, 1963. – 214 с.
2. Юрьев Б.П., Меламуд С.Г. Исследование механизма и кинетики диссоциации бакальских сидеритов при термообработке // *Металлы*. – 1998. – № 3. – С. 3–9.
3. Гегузин Я.Е. Физика спекания / Я.Е. Гегузин. – М.: Наука, 1984. – 312 с.
4. Бальшин М.Ю. Основы порошковой металлургии / М.Ю. Бальшин, С.С. Кипарисов. – М.: Металлургия, 1978. – 184 с.