

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ОБЖИГА МЕЛКИХ ФРАКЦИЙ СИДЕРИТА ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ

Матюхин В.И., к.т.н., доцент кафедры «Теплофизика и информатика
в металлургии» (matyhin53@mail.ru)

Меламуд С.Г., к.т.н., зам. директора института материаловедения и металлургии

Шацлло В.В., аспирант кафедры «Металлургия железа и сплавов»

Матюхин О.В., к.т.н., доцент кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии»

Матюхина А.В., к.т.н., доцент кафедры «Стандартизация и сертификация»

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

Аннотация. Для более полного использования железных руд Бакальского рудоуправления предложен обжиг во вращающейся печи в присутствии добавок твердого топлива. Исследования особенностей кинетики тепловой обработки образцов в атмосфере воздуха при скорости нагрева 10 град/мин позволили выделить семь технологических стадий: сушка; подогрев; диссоциация карбонатов; окисление ферритов; формирование труднорастворимых силикатов; расплавление, которые сопровождаются изменением их теплового состояния и условий уплотнения. Исследования изменений линейных размеров сидеритовых образцов в процессе нагрева позволили определить 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 баланс.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-9-652-657

Одним из крупнейших месторождений железных руд на Южном Урале является Бакальское, общие запасы которого достигают 1 млрд т. Рудные компоненты в них представлены преимущественно сидероплезитом и пестомезитом [1]. По существующей технологии переработки железных руд на Бакальском рудоуправлении основным видом товарной продукции является концентрат обожженного сидерита 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. Если учесть, что в руднике выход кондиционной руды достигает не более 20 – 40 %, то при существующей технологии обогащения основная масса рудных компонентов остается не востребованной промышленностью и складировается в отвалах.

Исходный сидерит отличается относительно низким содержанием железа (до 28 – 38 %) 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.

Исследования условий развития основных физико-химических процессов при обжиге сидеритов производили с использованием экспериментальных кривых дифференциальной сканирующей калориметрии мелкодисперсных проб сидерита в атмосфере воздуха при скорости нагрева 10 град/мин (рис. 1). Их анализ позволяет выделить ряд технологических стадий. В процессе тепловой обработки до температуры 77 – 87 °С рудный сидерит первоначально подвергается процессам обезвоживания с целью удаления физически связанной влаги (участок 1). 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 незначительно с постепенным повышением теплосодержания образцов. В интервале температур до 600 – 640 °С (участок 3) наблюдается развитие процессов диссоциации карбонатов железа, магния и марганца с потерей массы и поглощением теплоты (67,11 кДж/кг). Образовавшиеся оксиды вступают между собой в твердофазные реакции с образованием магний-марганцевых магнетита и вюстита [2]. По достижении уровня разогрева 600 – 750 °С в атмосфере воздуха (участок 4) развиваются явления окисления образовавшихся соединений до магний-марганцевых ферритов и гематита с

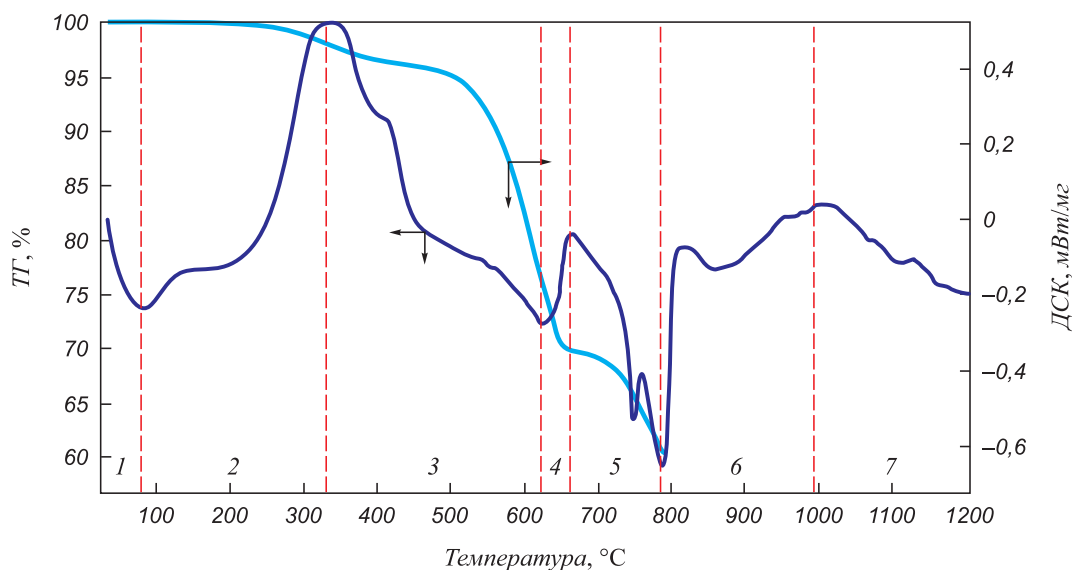


Рис. 1. Дериватограмма процесса тепловой обработки образца сидерита при скорости нагрева 10 град/мин в окислительной среде воздуха. ТГ – термогравиметрическая зависимость; ДСК – дифференциально-сканирующая кривая калориметрии

Fig. 1. Thermogram of thermal treatment process of the sample at a heating rate of siderite of 10 grad/min. in an oxidizing atmosphere of air. TG – thermogravimetric dependence; DSC – differential scanning curve of calorimetry

выделением избыточного тепла. При этом теплосодержание образцов увеличивается.

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

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

Последующий нагрев образцов приводит к расплавлению исходных компонентов, которое протекает с поглощением тепла (участок 7). При обжиге сидеритовых руд в этот период 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 рудных систем независимо от вида их основы, создание прочной структуры окускованного материала из отдельных частиц можно представить как частный случай спекания дисперсных порошков, осложненный протеканием физико-химических преобразований на границах зерен с выделением газов [3]. Последовательное повышение температуры тепловой обработки приводит к увеличению количества контактов между частицами, находящимися в соприкосновении, и при «автономной консолидации» системы [4] формирует внутреннее строение обжигаемых материалов.

На рис. 2 представлена дилатограмма изменения линейных размеров образца, изготовленного из мелко-дисперсного сидерита методом прессования при удельном давлении 100 кг/см² в процессе его непрерывного нагрева в атмосфере воздуха со скоростью 10 град/мин. Исследование этих данных позволяет выделить несколько технологических периодов их уплотнения, в течение которых в структуре образцов протекают физико-химические процессы, характеризующиеся внутренними кристаллохимическими преобразованиями и согласующиеся с результатами, показанными на рис. 1. Низкотемпературный период (до 75 – 80 °С) сушки образцов сопровождается преимущественным сокращением линейных размеров нагреваемых материалов (период 1). До температуры около 500 °С (период 2) получают преимущественное развитие

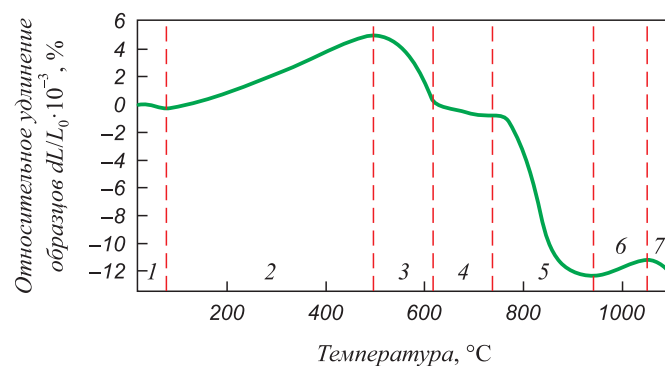


Рис. 2. Изменение линейных размеров образца сидерита в процессе непрерывного нагрева

Fig. 2. Changes in linear dimensions of the siderite sample during continuous heating

процессы теплового расширения рудной основы, характеризующиеся увеличением линейных размеров обжигаемых материалов. Термическая диссоциация карбонатов (период 3) происходит с выделением из структуры материалов диоксида углерода, который, изменяя структуру образцов, способствует увеличению объема тела. Однако развивающиеся одновременно процессы спекания, обусловленные термической активацией обжигаемых частиц, превышают результаты расширительных явлений и при нагреве образцов до температуры 620 °С наблюдаются преимущественно усадочные явления.

Нагрев материалов до температур около 740 °С (период 4) приводит к окислению закиси железа, образовавшейся на предыдущих стадиях. Согласно полученным данным, в этот период наблюдается увеличение линейных размеров испытуемых образцов, связанное с разрыхлением их структуры выделяющимися газами и изменением параметров кристаллических решеток составляющих кристаллических фаз.

В период кристаллохимических преобразований до температуры 940 °С (период 5) происходят процессы твердофазного спекания с формированием более плотной структуры и развитием усадочных явлений. При этом следует отметить последовательное протекание двух процессов: образование до 800 °С магнезиоферрита, происходящее с увеличением параметров кристаллической решетки, а при более высоких температурах образование марганцевого феррита, способствующее уплотнению конечного продукта.

При повышении уровня нагрева материалов до 1020 °С (период 6) происходит доокисление оксидных фаз ранее образовавшихся соединений железа и марганца с выделением избыточного тепла и газов. При этом формирование жидкой фазы по границам зерен обеспечивает сокращение линейных размеров обжигаемых образцов, а образование в их структуре разрыхляющих газов способствует развитию расширительных явлений. Суммарно этот период характеризуется увеличением объема 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 отделения от пустой породы.

Образование избыточной жидкой фазы в структуре образцов существенно ускоряет усадочные явления с уменьшением их линейных размеров и оплавлением отдельных зерен (период 7). В процессе спекания порошковых материалов снижается их пористость за счет последовательного увеличения объема закрытых пор и сокращения объема открытых [4]. При этом искусственные новообразования дисперсных частиц, обладающих высокой удельной поверхностью и значительной поверхностной энергией, по мере повышения температуры способны уплотняться, уменьшая открытую

пористость при зарастании отдельных пор. Скорость этого процесса определяется вязкостью образующегося на поверхности тел расплава и ограничена его подвижностью. Перемещение вещества между частицами происходит в виде адсорбированных подвижных атомов по границам зерен при их повышенной подвижности вблизи возникших структурных дефектов. Высокая температура нагрева материалов способствует увеличению подвижности атомов и возникновению между частицами перемычек из жидкого расплава, что ускоряет процесс уплотнения образцов.

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 [5] являются привлекательными с точки зрения 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 при 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 обжига сидеритовых руд. В основе оценки возможностей использования этого теплового агрегата лежат данные о состоянии и соотношении статей материального и теплового балансов, полученных на основании экспериментальных измерений.

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

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

Для определения основных массовых потоков на обжиговой печи был составлен ее материальный баланс (табл. 3). Анализ полученных данных позволяет установить, что в приходной части материального баланса

Таблица 1

Таблица 2

Технологические параметры обжига мелкой фракции сидеритов во вращающейся печи

Table 1. Technological parameters of firing of siderite small fraction in a rotary furnace

Наименование	Величина
Расход шихты, кг/ч, в том числе:	17 500
– сидерит	14 000
– кокс	3500
Влажность шихты, %	20,41
Расход природного газа, м ³ /ч	1000
Расход воздуха, м ³ /ч, в том числе:	13 000
– организованного	10 000
– подсасываемого	3000
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

обжиговой печи доля твердых компонентов составляет 17 500 кг/ч или 52,44 %. Выход обожженного продукта из сидерита составляет только $8689,66 / 14\ 000 = 62,07\ %$.

Усредненный химический состав исходных рудных компонентов и продуктов обжига

Table 2. The average chemical composition of the original ore components and products of firing

Вид материала	Химический состав, %			
	Fe _{общ.}	FeO	Fe _{мет.}	п.п.п.
Сидерит	20,55	28,98	0,0	46,04
Обожженная магнитная фракция	50,73	20,28	33,42	14,9
Обожженная немагнитная фракция	4,08	6,35	2,85	66,23

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 в соответствии с методикой, приведенной в работе [6] (табл. 4).

Анализ статей теплового баланса показал, что тепловой КПД агрегата при обжиге мелкой фракции сидеритов в присутствии добавок кокса составляет $8,55 + 68,72 = 77,27\ %$ благодаря использованию внутреннего источника теплоты в виде горящего твердого топлива. Поскольку в процессе исследований разделить тепловые эффекты экзо- и эндотермических реакций в слое не представлялось возможным, то при составлении теплового баланса определялся их суммарный результат.

Основной расход тепловой энергии на печи связан с физической теплотой готового продукта (8,55 %), который частично утилизируется в барабанном холодильнике в виде физической теплоты подогретого воздуха в количестве 1201,59 кВт (3,41 %) с его возвратом в рабочее пространство, а также с физической теплотой отходящих газов, утилизация которых может осуществляться с применением теплоэнергетического оборудования.

Таблица 3

Материальный баланс обжига сидеритов во вращающейся печи

Table 3. Material balance of siderite firing in a rotary furnace

Приход массы			Расход массы		
наименование статьи	количество		наименование статьи	количество	
	кг/ч	%		кг/ч	%
Сидерит	14 000	41,95	Обожженный продукт	8689,66	26,04
Кокс	3500	10,49	Отходящие газы	20 887,42	62,61
Природный газ	215	0,64	Выбросы пыли	3796,80	11,38
Расход воздуха	15 658,88	46,92			
Итого: приход массы	33 373,88	100,00	Итого: расход массы	33 373,88	100,00

Тепловой баланс вращающейся печи для обжига сидеритов

Table 4. The heat balance of a rotating furnace for siderite firing

Приход теплоты			Расход теплоты		
наименование статьи	количество		наименование статьи	количество	
	кВт	%		кВт	%
Химическая теплота, в том числе:	34 073,75	96,59	Физическая теплота обожженного продукта	3017,18	8,55
– кокса	24 115,97	68,36			
– природного газа	9957,78	28,23			
Физическая теплота подогретого воздуха	1201,59	3,41	Физическая теплота отходящих газов	5471,24	15,51
			Физическая теплота пыли	969,34	2,75
			Потери теплоты с химическим недожогом	72,4	0,21
			Теплота эндотермических реакций	24 241,37	68,72
			Потери теплоты в окружающую среду	1503,81	4,26
Итого: приход теплоты	35 275,34	100,0	Итого: расход теплоты	35 275,34	100,00

Обращает на себя внимание повышенная доля потерь теплоты с пылью. Ее утилизация может быть обеспечена использованием отдельных теплообменников, устанавливаемых в осадительной пылевой камере.

Выводы. 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.

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 %), с химическим недожогом (0,21 %) и в окружающую среду через стенки печи (4,26 %).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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. Определение теплофизических свойств материалов металлургического производства / Б.П. Юрьев, В.А. Гольцев, В.И. Матюхин и др. – Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2014. – 180 с.
3. Гегузин Я.Е. Физика спекания. – М.: Наука, 1984. – 312 с.
4. Юсфин Ю.С., Пашков Н.Ф. Металлургия железа. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 464 с.
5. Теплотехнические расчеты печей глиноземного производства / С.Н. Гушин, В.А. Гольцев, В.И. Матюхин и др. – Екатеринбург: УГТУ, 2000. – 230 с.
6. Металлургические печи. Теория и расчеты: В 2-х томах. Т. 2. / В.И. Губинский, В.И. Тимошпольский, В.М. Ольшанский и др. / Под ред. В.И. Тимошпольского, В.И. Губинского. – Минск: Белорус. наука, 2007. – 832 с.

Поступила 9 июля 2015 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. Vol. 58. No. 9, pp. 652–657.

THE INVESTIGATION OF FIRING OF SIDERITE SMALL FRACTIONS IN A ROTARY FURNACE

Matyukhin V.I., Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy” (matyhin53@mail.ru)

Melamud S.G., Cand. Sci. (Eng.), Deputy Director of the Institute of Materials Science and Metallurgy

Shatsillo V.V., Postgraduate of the Chair “Metallurgy of iron and alloys”

Matyukhin O.V., Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”

Matyukhina A.V., Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Standardization and Certification”

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (19, Mira str., Ekaterinburg 620002 Russia)

Abstract. The Bakal Mining Administration was asked to burn iron ores in a rotary furnace in the presence of solid fuel additives for more in-depth use of them. The kinetics studies of their characteristics of heat treatment in air at a heating rate of 10 grad./min made 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. The studies of changes of linear dimensions siderite samples during the isospeed heating made possible to establish the strengthening conditions for their structures in selected stages of heat treatment. The

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

Keywords: siderite, kinetics of crystal-chemical transformations, densification kinetics, rotary furnace, material and heat balances.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-9-652-657

REFERENCES

1. Timeskov V.A. *Mineralogiya karbonatnykh rud i vmeshchayushchikh ikh karbonatnykh porod Bakal'skogo zhelezorudnogo mestorozhdeniya na Yuzhnom Urale* [Mineralogy of carbonate ores and their host carbonate rocks of Bakal iron ore deposit in the Southern Urals]. Kazan: Kazanskii universitet, 1963, 214 p. (In Russ.).
2. Yur'ev B.P., Gol'tsev V.A., Matyukhin V.I., Matyukhin O.V., Sheshukov O.Yu. *Opreделение тепловых свойств материалов металлургического производства* [Determination of thermal properties of materials of metallurgical production]. Ekaterinburg: OOO "UIPTs", 2014, 180 p. (In Russ.).
3. Geguzin Ya.E. *Fizika spevaniya* [Physics of sintering]. Moscow: Nauka, 1984, 312 p. (In Russ.).
4. Yusfin Yu.S., Pashkov N.F. *Metallurgiya zheleza* [Metallurgy of iron]. Moscow: IKTs "Akademkniga", 2007, 464 p. (In Russ.).
5. Gushchin S.N., Gol'tsev V.A., Matyukhin V.I., etc. *Teplotekhnicheskie raschety pechei glinozemnogo proizvodstva* [Thermal calculations of furnaces for alumina production]. Ekaterinburg: UGTU, 2000, 230 p. (In Russ.).
6. *Metallurgicheskie pechi. Teoriya i raschety. T. 2* [Metallurgical furnace. Theory and calculation: Vol. 2]. Timoshpol'skii V.I., Gubinskii V.I., Olshanskii V.M. eds. Minsk: Belorus. Nauka, 2007, 832 p. (In Russ.).

Received July 9, 2015