

## **ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ВОССТАНОВИТЕЛЬНОМУ ОБЖИГУ СИДЕРИТОВЫХ РУД**

### **Аннотация**

*Установлено, что существующий в настоящее время метод подготовки сидеритовой руды на Бакальском рудоуправлении к доменной плавке не позволяет получать концентрат, который отвечал бы требованиям современной металлургии. Наиболее перспективным методом является восстановительный обжиг с получением металлизированного продукта с более высоким содержанием железа. Показано, что для реализации данного метода необходимо использовать трехзонную шахтную печь, имеющую три зоны: зону окислительного обжига, зону восстановления и зону охлаждения восстановленного продукта. Проведены экспериментальные исследования по восстановительному обжигу сидеритовой руды на лабораторных установках. Показана возможность с использованием газа воздушной конверсии природного газа получать продукт, пригодный для доменного передела со степенью восстановления порядка 60 %. Полученные результаты использованы при разработке технологии восстановительного обжига сидеритовой руды в трехзонной шахтной печи.*

**Ключевые слова:** сидеритовая руда, шахтная печь, металлизированный продукт, исследования, атмосфера, водород, степень восстановления, технология, содержание железа, природный газ, удельный расход, состав, конвертированный газ.

### **Abstract**

*It was determined that the current method of the Bakalsk mining department siderite ore preparation for blast-furnace smelting does not allow production of concentrate meeting the modern metallurgy requirements. The most perspective method is reducing firing with higher iron content metallized iron product output. It was demonstrated that implementation of this method requires the use of three-zone shaft furnace having the oxidizing roasting zone, the reduction zone and the reduced product cooling zone. Experiments were carried out on the siderite ore reducing firing on laboratory units. The possibility to produce a product suitable for blast-furnace conversion with the reduction degree of about 60% with the use of natural gas air conversion gas was demonstrated. The obtained results were used in the process development for the siderite ore reducing firing in a three-zone shaft furnace.*

**Key words:** siderite ore, shaft furnace, metalized iron product, research, atmosphere, hydrogen, reduction degree, process, iron content, natural gas, specific consumption, composition, converted gas.

Анализ работ, посвященных различным способам подготовки сидеритовых руд к доменной плавке (запасы сидеритовых руд составляют 1 млрд. т [1]) показал [2], что при плавке обожженной сидеритовой руды и агломератов на их основе [3-5], содержащих 48 – 50 % железа, нельзя получить высоких показателей доменной плавки по сравнению с использованием концентратов, полученных из магнетитовых руд современными способами обогащения [6-7], и содержащих 62–65 % железа.

В связи с этим возникает необходимость разработки способа восстановления сидеритовых руд с получением металлизированного концентрата пригодного для доменного производства с высоким содержанием железа.

Целью данной работы является изучение процесса восстановительного обжига сидеритовой руды и обоснование необходимости использования шахтной печи, имеющей зоны окисления, восстановления и охлаждения.

В данной работе для изучения кинетики протекания процесса окислительного обжига и последующего восстановления использовалась установка позволяющая измерять изменение массы опытного образца или навески слоя. В процессе проведения опытов использовались газы  $H_2$ ,  $CO_2$ , Ar (He), а также компрессорный воздух.

Окислительный обжиг, вели до установления постоянной массы образца или навески. После этого подавали в реакционный стакан с исследуемым материалом Ar (He) для продувки и в зависимости от параметров опыта подавали восстановительный газ. После полного охлаждения производили взвешивание образца на аналитических весах.

Были исследованы образцы из сидеритовой руды размером 45–50 мм. Химический состав исходной сидеритовой руды приведен в табл. 1. Условия проведения опытов и некоторые результаты приведены в табл. 2. Химический состав обожженных и восстановленных кусков сидеритовой руды приведен в табл. 3. Термограммы опытов и изменение массы обжигаемых образцов руды приведены на рис. 1, 2, 3.

Таблица 1

Химический состав исходной сидеритовой руды

Номер опыта	Содержание, %						
	Fe <sub>общ</sub>	FeO	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	S	O <sub>2</sub> '
1	34,8	48,8	0,5	1,9	11,8	0,064	9,7
2	30,9	40,0	3,8	1,5	13,8	0,039	8,9
3	35,3	45,3	0,5	0,4	12,3	0,036	10,1

Примечание. Оксиды FeO, CaO и MgO находятся в виде соединений  $FeCO_3$ ,  $CaCO_3$ ,  $MgCO_3$ .

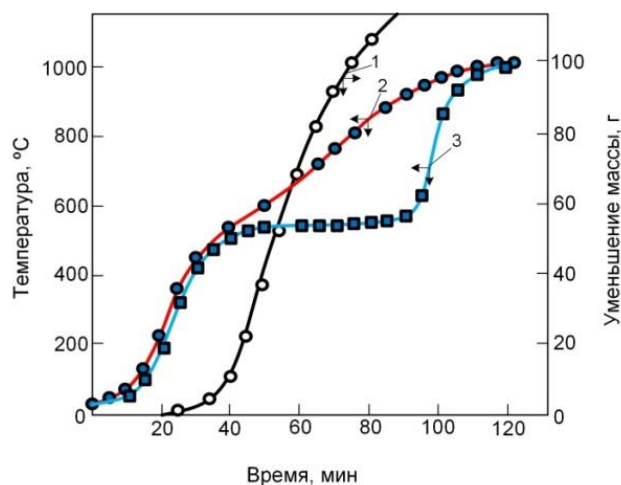


Рис. 1. Изменение температуры и массы образца во времени (опыт 1: 1 – уменьшение массы образца; 2 – температура поверхности образца; 3 – температура центра образца)

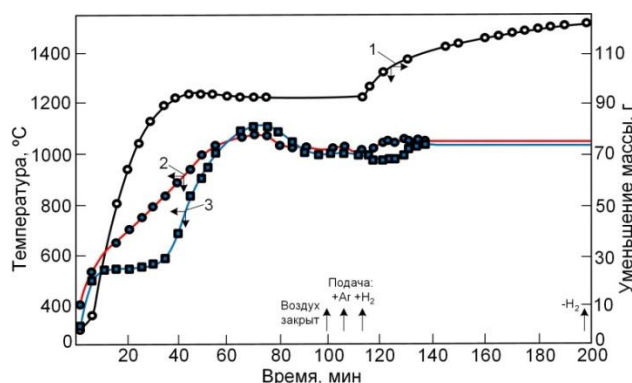


Рис. 2. Изменение температуры и массы образца во времени (опыт 2: 1 – уменьшение массы образца; 2 – температура поверхности образца; 3 – температура центра образца)

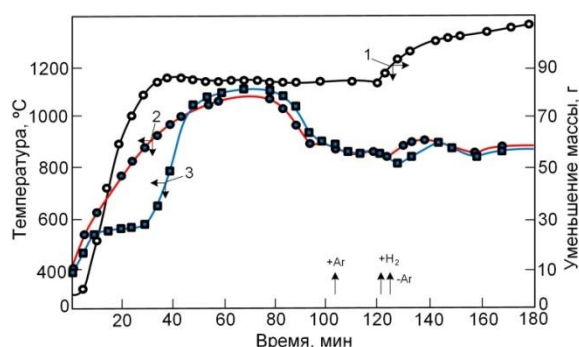


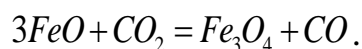
Рис. 3. Изменение температуры и массы образца во времени (опыт 3: 1 – уменьшение массы образца; 2 – температура поверхности образца; 3 – температура центра образца)

Таблица 2

Условия проведения опытов и некоторые результаты

Номер опыта	Масса куска, г		Температура окислительного обжига, °C	Температура восстановления, °C	Вид газа		Продолжительность опыта, мин	
	до опыта	после опыта			для окислительного обжига	для восстановления	окислительного обжига	восстановления
1	310,2	192,0	1000	–	Аргон	–	120	–
2	244,5	127,1	1070	1010	Воздух	Ar+H <sub>2</sub>	110	90
3	223,2	118,5	1070	850	Воздух	H <sub>2</sub>	120	60

Из рис. 1 видно, что при температуре 500 °C начинается разложение карбонатов ( $MeCO_3 = MeO + CO_2$ ). В процессе разложения карбонатов происходит частичное окисление монооксида железа до магнетита за счет диоксида углерода по реакции



Из данных табл. 3 следует, что после разложения в атмосфере аргона получилась смесь оксидов FeO и Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> состава  $1,30FeO + Fe_3O_4$ . При этом 43,5 %

образовавшегося монооксида железа FeO прореагировало с CO<sub>2</sub>, а 56,5 % перешло в обожженный продукт.

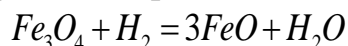
Таблица 3

Химический состав обожженной и восстановленной сидеритовой руды

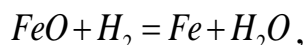
Номер опыта	Содержание, %							Степень восстановления, %	Примечание
	Fe <sub>общ</sub>	FeO	S	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Fe <sub>мет</sub>		
1	56,3	38,6	0,05	0,5	2,5	17,5	–	18	Средняя проба всего куска
2	60,2	48,2	нет	6,0	3,6	22,9	26,5	58,2	Верхний слой
	61,3	64,0	0,004	5,2	3,7	22,6	24,7	60,0	Промежуточный слой
3	58,3	55,1	0,003	5,2	3,7	22,6	17,7	51,0	Ядро куска
	64,5	51,5	0,005	0,5	0,2	24,7	24,8	58,5	Средняя проба всего куска

В опытах 2 и 3 разложение образцов из сидеритовой руды происходит в атмосфере воздуха. После разложения карбонатов начинается окисление FeO и Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> кислородом воздуха и масса образца несколько увеличивается. Только после разложения карбонатов возможна диффузия кислорода внутрь образца и протекание реакции окисления Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> до Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с выделением теплоты [2].

В опыте 2 восстановление обожженной сидеритовой руды осуществляли газом, состоящим из 40 % H<sub>2</sub> и 60 % Ar при температуре порядка 1000°C. Такой состав газа и температура ближе соответствует газу воздушной конверсии природного газа. При этом протекают реакции



и



сопровождающиеся поглощением теплоты.

Для определения химического состава восстановленной руды образец был разделен на три слоя: поверхностный слой, промежуточный и ядро. Масса каждого слоя была примерно одинакова. Как видно из данных табл. 3, содержание монооксида железа увеличивается, а металлического железа уменьшается от поверхности образца к центру, что указывает на значительные диффузионные сопротивления в образце руды размером 45 – 50 мм. Средняя степень восстановления образца составляла 56,4 %.

В опыте 3 термограмма и кривые изменения массы качественно повторялись, как и в опыте 2. Степень восстановления продуктом водорода при температуре 850°C равнялась 58,5 %.

Проведены опыты с целью получения данных по обжигу руды в нейтральной атмосфере (аргоне) на образцах размером 12 – 15 мм. Анализ полученного обожженного продукта показал, что в нейтральной атмосфере происходит частичное окисление FeO за счет выделяющегося CO<sub>2</sub> до Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. При этом степень восстановления продукта по отношению к полному окислению до

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> составляет 19 %, что в дальнейшем восстановительном процессе предопределяет уменьшенный расход восстановительного газа.

Проведены эксперименты по получению восстановленного продукта реакционным газом, имитирующим газ воздушной конверсии природного газа с коэффициентом избытка воздуха  $\alpha=0,4$ . Состав газа, %: 10,7 CO; 27,5 H<sub>2</sub>; 2,9 CO<sub>2</sub>; 58,9 Ar. При температуре обжига 900°C и размере образцов 12 – 15 мм получена степень восстановления 59,8 %. Обоженный продукт и мел состав, %: 66,3 Fe<sub>общ</sub>; 50,3 FeO; 26,6 Fe<sub>мет</sub>; 0,83 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Следовательно, газом воздушной конверсии можно получить продукт, пригодный для доменного передела.

Опыты с образцами руды крупностью 2 – 5 мм показали, что увеличение температуры восстановительного обжига сидеритовых руд предварительно прошедших окислительный обжиг при 1000°C, с 800 до 1000°C приводит к возрастанию степени восстановления с 91,5 до 95,7 % при одинаковом времени восстановления. В результате обжига и восстановления в атмосфере водорода получена степень восстановления обоженного продукта равная 96,8 %.

#### *Заключение*

В результате проведенных экспериментальных исследований показана принципиальная возможность получения из сидеритовой руды восстановленного продукта с высоким содержанием железа, который может быть использован в доменных печах. Для внедрения предложенной технологии восстановительного обжига сидеритовой руды предложенная шахтная печь, состоящая из зон окисления, восстановления и охлаждения восстановленного продукта. Полученные результаты использованы при разработке оптимальных режимов обжига сидеритовой руды в шахтной печи с получением восстановленного продукта с высоким содержанием железа.

#### **Список использованных источников**

1. Пирометаллургическая переработка комплексных руд / Л.И. Леонтьев, Н.А. Ватолин, С.В. Шаврин, Н.С. Шумаков. – М.: «Металлургия», 1997. – 431 с.
2. Технологические и теплотехнические основы подготовки сидеритовых руд к металлургическим переделам: монография / Б.П. Юрьев, С.Г. Меламуд, Н.А. Спирин, В.В. Шаццлло. – Екатеринбург: ООО АМК «День РА», 2016. – 428 с.
3. Особенности спекания бакальских сидеритовых руд / А.Г. Жунев, Б.П. Юрьев // Сталь. 2010. № 7. – С. 10-13.
4. Использование сидеритовых руд при производстве агломерата и выплавке чугуна / С.Г. Меламуд, Б.П. Юрьев, И.А. Дудчук // Сталь. 2015. № 1. – С. 5-8.
5. Опытные доменные плавки подготовленных сидеритов с получением высокомагнезиальных шлаков / Г.П. Вяткин, Л.Я. Гаврилюк, А.Г. Жунев [и др.] // Сталь. 1996. № 1. – С. 17-21.
6. Технологические аспекты производства окатышей из магнетитовых руд / Т.Я. Малышева, Ю.С. Юсфин, С.В. Плотников // Известия вузов. Черная металлургия. 2011. № 9. – С. 3-5.

7. Oxidation processes in titanomagnetites / P.W. Readman, W.O. Reilly // Z. Geophys B. 37. 1971. № 3. – Pp. 329-338.

УДК 621.1

**Л. А. Шмакова, В. А. Микула**

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ВИХРЕВОЙ ТОПКИ ВОЗДУШНОГО КОТЛА**

### **Аннотация**

*В работе было рассмотрено использование низкотемпературной вихревой технологии, для её применения в схеме воздушного котла. Воздушный котел является одним из ключевых элементов в схеме гибридной ПГУ-ВЦГ с внешним сжиганием топлива на основе процессов термообработки угля и «внешнего» сжигания топлива. В работе была создана модель низкотемпературной вихревой топке. Модель рассчитана с помощью CFD-моделирования. Проанализировано влияние температуры газов рециркуляции на температуру продуктов сгорания.*

**Ключевые слова:** вихревая топка, рециркуляция дымовых газов, низкая температура, ПГУ-ВЦГ, воздушный котел.

### **Abstract**

*The article considered the use of low-temperature swirling-type technology, for its application in the air-boiler design. The air boiler is one of the key elements in the scheme of hybrid integrated gasification combined cycle with external fuel combustion based on processes of coal heat treatment and "external" combustion of fuel. The model of swirling-type furnace was created in this paper. The model was calculated using CFD-modeling. The influence of flue gas recirculation temperature on combustion gases temperature was analyzed.*

**Key words:** swirling-type furnace, flue gas recirculation, low temperature, IGCC, air boiler.

Парогазовые установки с внутрицикловой газификацией с внешним сжиганием твердых топлив одно из перспективных направлений использования природных ресурсов в виде угля.

Воздушный котел (ВК) один из основных элементов в схеме гибридной ПГУ-ВЦГ с внешним сжиганием топлива на основе процессов термообработки угля и «внешнего» сжигания топлива. Сжатый воздух, направляемый в камеру сгорания газовой турбины, возможно нагреть в ВК до 750-900 °С. В связи с тем, что воздух до необходимой температуры возможно нагреть в конвективных поверхностях ВК, принято решение отказаться от радиационных поверхностей нагрева в топке [1].

Низкотемпературная вихревая технология была разработана в России в 1970-х г.г. и на данный момент прошла широкую апробацию в энергетике. Перспективность НТВ-технологии объясняется тем, что в энергетической стратегии России на период до 2035 года она рекомендуется для внедрения [2]. НТВ-технология должна позволить поддерживать необходимую температуры продуктов сгорания на входе в конвективную часть.