

УДК 669.127.44

*д.т.н. Новохатский А. М.,  
Филиппенко Д. Г.,  
Иванишкин Д. С.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР, tafadimas@mail.ru)*

## ПРЯМОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО КОНЦЕНТРАТА АНТРАЦИТОМ

*Рассмотрено восстановление железа из железорудного концентрата углеродом антрацита в твёрдофазном виде. Представлена схема производства стали, исключая различные металлургические переделы (коксохимический, агломерационный, доменный, конвертерный).*

**Ключевые слова:** концентрат, твёрдый углерод (антрацит), прямое восстановление железа, губчатое железо, переплав.

Процессы восстановления твёрдых оксидов металлов, как правило, классифицируются в зависимости от типа восстановителя. Взаимодействие оксида металла с газообразным восстановителем принято называть реакцией косвенного восстановления, а с твёрдым углеродом — реакцией прямого восстановления. Возможность осуществления твёрдофазных реакций, по заключению ряда исследователей [1], весьма ограничена, поэтому к отличительным признакам прямого восстановления оксидов обычно относят, во-первых, протекание процесса в области высоких температур, во-вторых, образование в качестве продукта реакции монооксида углерода. Однако механизм прямого восстановления до сих пор не имеет однозначного объяснения; не существует и чётких критериев различия между прямым и косвенным восстановлением, так как твёрдофазное восстановление объясняется опять же посредством косвенного восстановления с участием промежуточных газофазных реакций.

За девяносто лет, прошедших с тех пор, как в 1926 г. А. А. Байков высказал фундаментальную идею о решающей роли газообразных восстановителей (СО, Н<sub>2</sub>) в процессе прямого восстановления оксидов металлов, механизм этого самого «прямого восстановления» так и остался неизвестным, несмотря на то, что отдельно взятые реакции восстановления оксидов металлов твёрдым угле-

родом, оксидом углерода и водородом изучены вдоль и поперёк и многократно описаны в металлургической литературе.

Прямое восстановление осуществляли во всех мыслимых условиях (в вакууме, под давлением, изменяя составы сырьевых смесей, применяя положения механохимии и электрохимии и т. д. и т. п.), но основные принципы течения процесса, а точнее условия, благоприятствующие его интенсификации, так и остались неразрешимой загадкой двадцатого века, о чём свидетельствуют цитаты из классиков отечественной металлургии: «Механизм восстановления окислов металлов твёрдым углеродом является одним из наименее экспериментально разработанных в теоретической металлургии. Не только детали, но и макроскопические этапы этого важнейшего технологического процесса не имеют ещё должного опытного обоснования» [2].

Использование твёрдого топлива в качестве восстановителя при получении металлизированных продуктов является перспективным направлением металлургии. По сравнению с традиционными способами металлизации, основанными на применении в качестве восстановителя конвертируемого природного газа, использование твёрдого топлива позволяет значительно снизить себестоимость продукции за счёт более низкой стоимости сырья и возможности создания компактных промышленных агрегатов [3].

После успешного проведения экспериментов с использованием химически чистых материалов, таких как гематит и древесный уголь, получения крицы и переплава её в сталь [4] решено было перейти на производственные материалы, такие как концентрат и антрацит.

Цель научной работы — провести опытные исследования восстановления мелкодисперсного железорудного концентрата, смешанного с измельчённым антрацитом, при температуре 1100 °С. В качестве углевосстановителя выбиралось наиболее химически чистое вещество от серы, основная составляющая которого — углерод. Этим требованиям соответствует уголь марки А.

Технический анализ антрацита производился в лаборатории кафедры МЧМ. Согласно ГОСТ 11014-2001 [5] определялась влажность аналитической пробы антрацита. Сущность метода заключается в высушивании навески аналитической пробы топлива с максимальным размером зёрен 0,2 мм в сушильном шкафу при температуре (160±5) °С и вычислении массовой доли влаги по потере массы. Из аналитической пробы топлива во взвешенные бюксы отбиралась навеска топлива массой 100 г. После этого открытые бюксы с навесками были помещены в сушильный шкаф, предварительно нагретый до температуры (160±5) °С, и при этой температуре высушены в течение 5 минут. По окончании сушки бюксы вынимались из сушильного шкафа, закрывались крышками и охлаждались на воздухе в течение 5 минут, затем до комнатной температуры в эксикаторе, после чего навеска взвешивалась. Массовая доля общей влаги вычислялась по формуле:

$$W = \frac{m_1}{m} \cdot 100, \quad (1)$$

где  $m_1$  — потеря массы при сушке навески топлива, г;  $m$  — масса навески пробы топлива, г.

Общая влажность антрацита составила:

$$W = \frac{4,4774}{100} \cdot 100 = 4,47\%.$$

Согласно ГОСТ 6382-91 [6] определялся выход летучих веществ из антрацита как разность потери массы и влаги при нагревании топлива в стандартных условиях без доступа воздуха. Определение влаги и выхода летучих веществ проводили одновременно, чтобы можно было ввести соответствующую поправку. Сущность метода заключается в нагревании навески антрацита без доступа воздуха при температуре (850±5) °С в течение 7 минут и определении выхода летучих веществ по разности общей потери массы навески и потери за счёт испарения влаги. Выход летучих веществ из аналитической пробы топлива  $V^a$  вычислялся по формуле:

$$V^a = \frac{100 \cdot (m_2 - m_3)}{m_2 - m_1} - W^a, \quad (2)$$

где:  $m_1$  — масса пустого тигля с крышкой, г;  $m_2$  — масса тигля с крышкой и пробой до нагревания, г;  $m_3$  — масса тигля с крышкой и остатком после нагревания, г;  $W^a$  — массовая доля влаги в аналитической пробе топлива, определяемая по ГОСТ 11014, %.

Выход летучих веществ в антраците составил:

$$V^a = \frac{100 \cdot (36,45 - 35,36)}{36,45 - 24,84} - 4,47 = 4,92\%.$$

Согласно ГОСТ 11022-95 [7] определялось количество зольности топлива. Зола, оставшаяся после сжигания угля на воздухе, образуется из неорганических соединений, входящих в состав угольного вещества, и из присутствующих минеральных веществ. Сущность метода заключается в сжигании пробы топлива в муфельной печи при температуре (815±5) °С. Зольность в процентах рассчитывалась по массе остатка после прокаливании. Для определения зольности угля использовалась аналитическая проба, измельчённая до 0,2 мм. Тигель с навеской помещался в муфельную печь при комнатной температуре. В течение 60 минут температура повышалась

до 500 °С и выдерживалась в течение 30 мин. Далее нагрев продолжался до температуры 815 °С, которая выдерживалась в течение 90 мин. После этого несгоревший остаток доставался из печи и взвешивался. Зольность аналитической пробы А (% по массе) вычислялась по формуле:

$$A = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \cdot 100. \quad (3)$$

Зольность антрацита составила:

$$A = \frac{19,84 - 19,76}{20,81 - 19,76} \cdot 100 = 7,61\%.$$

Содержание серы в антраците 0,74 %.

В качестве железорудного сырья использовался взятый на Енакиевском металлургическом заводе ковдорский концентрат. Химический состав концентрата и его гранулометрический состав представлены в таблицах 1 и 2 соответственно.

В лабораторных условиях были спланированы и проведены опытные эксперименты по восстановлению концентрата антрацитом. Первый эксперимент проводился в шахтной печи, в которую загружался алундовый тигель, заполненный концентратом и измельчённым антрацитом. Шихта тщательно перемешивалась. Крупность измельчённого восстановителя составляла 0,2 мм. Известно, что реакции восстановления идут на границах соприкосновения материалов, поэтому для крупной шихты целесообразно использовать в качестве

восстановителя водород, поскольку газ лучше проникает в поры материала, однако внутри материала реакции не идут. Используя же в качестве восстановителя углерод антрацита, необходимо иметь достаточно мелкий материал, тем самым обеспечить большую площадь контакта между окислами железа и частицами угля, чем ускорить реакции прямого восстановления.

Целью данного эксперимента было получение восстановленного губчатого железа, которое дальше можно было бы переплавить в сталь. Стехиометрически рассчитано, что на восстановление 800 г железорудного концентрата необходимо 200 г антрацитовой мелочи. Алундовый тигель нагревался в печи до температуры 1100 °С, после чего данная температура выдерживалась в течение 2 часов. По истечении времени полученный материал извлекался из печи и взвешивался. В результате было получено губчатое железо, диаметр которого составил 50 мм, а высота 130 мм (рис. 1). Расчётным путём определялась степень металлизации ( $\varphi_{мет}$ ) по формуле:

$$\varphi_{мет} = \frac{Fe_{мет}}{Fe_{общ}} \times 100. \quad (4)$$

Расчёт степени восстановимости проводился с учётом потери массы навески с поправкой на содержание влаги выхода летучих веществ. Расчётная степень восстановления железа из оксидов составляла 94 %.

Таблица 1

Химический состав концентрата

Элемент	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	FeO	P	C	S	П.П.П	Fe <sub>общ</sub>
%	0,8	1,86	64,34	0,6	5,6	25,1	0,03	0,24	0,035	1,9	64,56

Таблица 2

Гранулометрический состав концентрата

Размер материала, мм	>0,63	0,63–0,515	0,515–0,2	0,2–0,16	0,16–0,1	0,1–0,063	0,063–0,05	<0,05
Количество фракции, %	2,68	1,62	9,96	13,87	34,9	34,08	2,61	0,28



Рисунок 1 Губчатое железо, полученное из железорудного концентрата и антрацита

Дальнейшей задачей было получить из восстановленного губчатого железа металл путём переплава. Поскольку полученный материал слишком пористый, переплав его в индукционной печи невозможен, так как токи Фуко не возникают в нём, а материал попросту не нагревается. Губчатое железо, восстановленное прямым путём, загружалось в графитовый тигель и помещалось в индукционную печь, тем самым все тепло забирал на себя тигель, нагревая материал.

При разогреве «губки» до температуры выше температуры плавления химически чистого железа (1539 °С), а именно 1600 °С, объём материала существенно уменьшился, что говорит о расплавлении железа. После остывания полученного слитка замерялась усадка железа, которая составила 75 %. На рисунке 2 изображено переплавленное губчатое железо. В таблицах 3 и 4 представлен химический состав шлака и полученного металла соответственно.



а)

б)

а — металл, полученный при переплаве губчатого железа;  
б — шлак, полученный при переплаве губчатого железа

Рисунок 2 Металл и шлак, полученный при переплаве

**МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

Таблица 3

Химический состав шлака

Элемент	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	MnO	K <sub>2</sub> O	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
%	38,2	19,5	12,5	4,78	6,87	9,22	1,08	0,36	0,14

Таблица 4

Химический состав переплавленного губчатого железа

Элемент	Fe	Si	S	Al	Mn	Ti	V	P	C
%	90,9	0,05	0,32	0,13	1,13	0,12	0,11	0,16	3,9

Из химического анализа металла видно, что в переплавленном губчатом железе имеется большое количество серы. Дабы избежать этого, стоит нагревать расплав металла до большей температуры, тогда кальций, переходящий в шлак, будет больше забирать на себя серы.

Наличие высокого уровня углерода связано с тем, что материал расплавлялся в графитовом тигле, из-за чего шло насыщение им металла. Подобный метод неприемлем для переплава губчатого железа. Дальнейшие исследования необходимо повторить, осуществляя переплав в электродуговой печи с использованием основной футеровки. Расплав всё равно будет насыщаться углеродом от

старающихся графитовых электродов, но по сравнению с графитовым тиглем это насыщение будет существенно снижено.

Данную технологию производства металла можно воплотить и в металлургическом производстве. В качестве агрегата-восстановителя можно использовать установку, подобную коксовой батарее. Очень важным параметром является повторное использование отходящих газов для обогрева самой печи.

Производство металла по данной схеме позволит отказаться от коксохимического, агломерационного, доменного и конвертерного производства и тем самым снизить себестоимость металла.

**Библиографический список**

1. Будников, П. П. Реакции в смесях твёрдых веществ [Текст] / П. П. Будников, А. М. Гинстлинг. — М. : Стройиздат, 1971. — С. 488.
2. Гельд, П. В. О взаимодействии окислов и их соединений с твёрдым углеродом [Текст] / П. В. Гельд, В. Г. Власов, Н. Н. Серебрянников // Журнал прикладной химии. — 1952. — Т. 25, № 2. — С. 121–133.
3. Новые процессы получения металла [Текст] / Ю. С. Юсфин и др. — М. : Наука, 1976. — 278 с.
4. Новохатский, А. М. Экстракция железа из гематита твёрдым углеродом [Текст] / А. М. Новохатский, Д. Г. Филиппенко // Сборник научных трудов ДонГТУ. — 2017. — № 4. — С. 49–56.
5. ГОСТ 11014-2001. Угли бурые, каменные, антрацит и горючие сланцы. Ускоренные методы определения влаги [Текст]. — Введ. 2003-01-01. — М. : Изд-во стандартов, 2002. — 8 с.
6. ГОСТ 6382-91. Топливо твёрдое минеральное. Методы определения летучих веществ [Текст]. — Введ. 1993-01-01. — М. : Изд-во стандартов, 1992. — 8 с.
7. ГОСТ 11022-95. Топливо твёрдое минеральное. Методы определения зольности [Текст]. — Введ. 1991-01-01. — М. : Изд-во стандартов, 1996. — 11 с.

© Новохатский А. М.  
 © Филиппенко Д. Г.  
 © Иванишкин Д. С.

*Рекомендована к печати к.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Ульяницким В. Н., консультантом по вопросам качества кокса и технологии доменной плавки Филиала № 12 ЗАО «ВНЕШТОРГСЕРВИС», к.т.н. Кузьменко В. Ф.*

*Статья поступила в редакцию 05.03.18.*

**д.т.н. Новохатський О. М., Філіпенко Д. Г., Іванішкін Д. С.** (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР, tafadimas@mail.ru)

#### **ПРЯМЕ ВІДНОВЛЕННЯ ЗАЛІЗОРУДНОГО КОНЦЕНТРАТУ АНТРАЦИТОМ**

*У статті розглянуто відновлення залізорудного концентрату вуглецем антрациту в твердому вигляді. Подано схему виробництва металу, що виключає різні металургійні переділи (коксохімічний, агломераційний, доменний, конвертерний).*

**Ключові слова:** концентрат, твердий вуглець (антрацит), пряме відновлення заліза, губчасте залізо, переплав.

**Doctor of Tech. Sc. Novohatskiy A. M., Philippenko D. G., Ivanishkin D. S.** (DonSTU, Alchevsk, LPR, tafadimas@mail.ru)

#### **DIRECT REDUCTION OF IRON-ORE CONCENTRATE BY ANTHRACITE**

*There has been examined the iron reduction from iron-ore concentrate by carbon of the hard-phase state anthracite. There has been presented the steelmaking flow diagram which eliminates the various metallurgical process stages (coke-chemical, agglomeration, blast-furnace, converter process).*

**Key words:** concentrate, hard carbon (anthracite), direct iron reduction, sponge iron, remelting.