



УДК 669.187.002.3

## ИЗУЧЕНИЕ СОСТАВА ОТРАБОТАННОГО ГАЗА ПРИ ПЛАЗМЕННОМ ЖИДКОФАЗНОМ ВОССТАНОВЛЕНИИ ЖЕЛЕЗА ИЗ РУДНОГО СЫРЬЯ ГАЗООБРАЗНЫМИ ВОССТАНОВИТЕЛЯМИ

**М. Л. Жадкевич, В. А. Шаповалов, Г. А. Мельник,  
Д. М. Жиров, А. А. Ждановский,  
К. А. Цыкуленко, О. М. Вислобоков**

С использованием хроматографического анализа определено изменение состава отработанного газа во времени в ходе плазменного жидкофазного восстановления железа из железорудных окатышей газообразными восстановителями при их пиролизе и воздушной конверсии.

Using the chromatographic analysis, the change in composition of used gas during plasma liquid-phase reduction of iron from iron ore pellets by gaseous reducing agents in their pyrolysis and air conversion was determined.

**Ключевые слова:** жидкофазное восстановление; плазма; газообразный восстановитель; хроматограф; состав газа; окисленность

В Институте электросварки им. Е. О. Патона НАНУ осуществляется разработка процесса восстановления железа из рудного сырья с применением плазменных источников нагрева. Предполагается выполнять процесс в два этапа: предварительное восстановление в твердой фазе и окончательное — в жидкой. Твердофазное восстановление железа детально исследовано и уже нашло довольно широкое применение в промышленности [1–3]. Жидкофазное восстановление, особенно с применением плазменных источников нагрева, изучено меньше, в связи с этим в Институте электросварки им. Е. О. Патона НАНУ исследуют процесс плазменного жидкофазного восстановления (ПЖФВ) [4, 5]. При этом в случае применения газообразных восстановителей особый интерес представляет определение состава отработанного газа и возможности его использования для твердофазного восстановления.

Исследования проводили на усовершенствованной лабораторной установке. Устройство последней и методика экспериментов описаны в работе [5]. Усовершенствование установки заключалось в добавлении к ней блока отбора газовых проб, представляющего собой водоохлаждаемый холодильник, через который проходит газовый канал с развитой поверхностью. Этот канал присоединен к трубе, предназначенной для вывода отходящих газов из

рабочего пространства установки. При необходимости отбора проб на выходе газового канала создают разрежение. В этом случае часть отходящих газов поступает по каналу через холодильник, после которого их можно отбирать для хроматографического анализа.

Хроматографический анализ проводили на хроматографе «Газохром 3101», позволяющем определять содержание в газовой смеси  $O_2$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$  и  $CO_2$ .

Проведена серия экспериментов по ПЖФВ железа из железорудных окатышей следующего состава, мас. %: 9,18  $SiO_2$ ; 0,32  $Al_2O_3$ ; 0,87  $CaO$ ; 0,37  $MgO$ ; 0,039  $S$ ; 0,007  $P$ ; 0,062  $C$ ;  $Fe_2O_3$  — основа. В качестве восстановителя и плазмообразующего газа служила пропан-бутановая смесь, содержащая 6 % бутана. Ее расход составлял 15 л/мин. Эксперименты проводили в режимах пиролиза и воздушной конверсии (расход воздуха 30 л/мин) в плазме непосредственно над железорудным расплавом.

Представлен состав отработанного газа при этих режимах в различные периоды процесса восстановления (таблица). Поскольку водяной пар в процессе прохождения через холодильник конденсируется, то сумма концентраций  $CO$ ,  $CO_2$  и  $H_2$  в газовой фазе составляет 100 % при пиролизе и около 80 % при воздушной конверсии из-за наличия в газовой смеси азота. В таблице указаны объемные доли водорода, моно- и диоксида углерода, измеренные хроматографом и полученные в результате пересчета в предположении, что пироуглерод полностью

© М. Л. ЖАДКЕВИЧ, В. А. ШАПОВАЛОВ, Г. А. МЕЛЬНИК, Д. М. ЖИРОВ, А. А. ЖДАНОВСКИЙ,  
К. А. ЦЫКУЛЕНКО, О. М. ВИСЛОБОКОВ, 2007



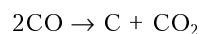
Состав отработанного газа при ПЖФВ железа из рудного сырья газообразными восстановителями

Режим	t, мин	CO, об. %		CO <sub>2</sub> , об. %		CO/CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> , об. %		H <sub>2</sub> O, об. %	H <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	β <sub>x</sub>	β <sub>ж</sub>
		Измерение	Пересчет	Измерение	Пересчет		Измерение	Пересчет				
Пиролиз	3	35	22	34,0	21	1,05	31	19	38	0,50	71	67
	5	45	34	12,5	9	3,78	42	32	25	1,28	54	58
	7	46	35	10,0	8	4,375	45	35	22	1,59	51	49
	10	48	40	3,0	3	13,33	49	41	16	2,56	43	38
Воздушная конверсия	3	33	24	16,0	11	2,18	27	19	27	0,70	63	60
	5	40	30	6,0	5	6,00	30	23	23	1,00	54	51
	7	41	33	2,0	2	16,5	38	31	15	2,07	45	40

реагирует со шлаковым расплавом с образованием CO, а сумма концентраций водорода и водяных паров относится к сумме концентраций моно- и диоксида углерода как 4:3, т. е. как водород к углероду в молекуле пропана, суммарное содержание CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O равняется 100 % при пиролизе и 81 % при воздушной конверсии (19 % должен составлять азот исходя из соотношения объемов поданных воздуха и пропан-бутановой смеси).

При восстановлении высших оксидов железа до вюстита содержание H<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub> в отработанном газе в равновесном состоянии превышает 90 % [6]. Однако при восстановлении железа из расплава чистого вюстита окисляется не более 16 % CO до CO<sub>2</sub> и не более 51 % H<sub>2</sub> до H<sub>2</sub>O в начале процесса. В дальнейшем эти показатели уменьшаются. Наличие в расплаве SiO<sub>2</sub> также ухудшает выход диоксида углерода и паров воды [1, 3, 7–9]. Представленные в таблице соотношения CO/CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O в целом соответствуют литературным данным о большей восстановительной способности водорода, по сравнению с монооксидом углерода при высоких температурах, и о снижении степени их использования по ходу процесса, что связано с уменьшением активности оксида железа. Меньшее содержание H<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub> в отработанном газе, чем указано в литературе, объясняется большой длительностью достижения состояния равновесия.

Важным показателем процесса восстановления является степень окисленности отработанного газа β, представляющая собой отношение количества молей кислорода в газовой смеси к количеству молей кислорода при полном окислении всех ее компонентов до H<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub> [1]. Таким образом, степень окисленности отработанного газа является показателем полноты использования газообразного восстановителя. В таблице представлена степень окисленности, определенная двумя методами: на основе данных хроматографического анализа β<sub>x</sub> и путем подсчета количества кислорода β<sub>ж</sub>, которое необходимо изъять из оксидов для получения выплавленного количества железа. Как правило, β<sub>x</sub> > β<sub>ж</sub>. Возможными причинами этого расхождения могут быть неполное реагирование пироуглерода с оксидами и протекающие реакции



при понижении температуры [1]. Подтверждением этого является осаждение сажи на холодных стенках камеры и в газовом канале холодильника.

Содержание CO и H<sub>2</sub> в отработанном газе после сушки должно соответствовать данным, полученным путем хроматографического анализа. Таким образом, отходящий из плавильного пространства газ целесообразно использовать для предварительного твердофазного восстановления. С целью уменьшения тепловых потерь отработанный газ можно направлять напрямую на предварительное восстановление, хотя при этом его восстановительный потенциал будет ниже, чем после сушки.

### Выводы

1. Подтверждена более высокая восстановительная способность водорода, по сравнению с монооксидом углерода, при значениях температуры, характерных для жидкофазного восстановления.
2. Показано, что отработанный после ПЖФВ газ целесообразно использовать для предварительного твердофазного восстановления.

1. Бондаренко Б. И., Шаповалов В. А., Гармаш Н. И. Технология бескоксовой металлургии / Под ред. Б. И. Бондаренко. — Киев: Наук. думка, 2003. — 534 с.
2. Курунов И. Ф., Савчук Н. А. Состояние и перспективы бескоксистой металлургии железа. — М.: Черметинформация, 2002. — 198 с.
3. Безкоксвая металлургия заліза: Підручник / В. П. Іващенко, О. Г. Величко, В. С. Терещенко, В. А. Чеченів. — Дніпропетровськ: Дніпро-ВАЛ, 2002. — 338 с.
4. К вопросу о плазменном жидкофазном восстановлении железа из оксидного сырья / В. А. Шаповалов, Г. А. Мельник, Д. М. Жиров и др. // Современ. электроталлургия. — 2005. — № 1. — С. 30 — 32.
5. Плазменное жидкофазное восстановление железа из его оксидов с применением газообразных восстановителей / М. Л. Жадкевич, В. А. Шаповалов, Г. А. Мельник и др. // Там же. — 2006. — № 2. — С. 20–24.
6. Перспективы развития технологии черной металлургии (научные предпосылки) / И. Н. Голиков, Г. В. Губин, А. К. Карклит и др. — М.: Металлургия, 1973. — 568 с.
7. Кожевников И. Ю. бескоксвая металлургия железа. — М.: Металлургия, 1970. — 336 с.
8. Юсфин Ю. С., Гиммельфарб А. А., Пашков Н. Ф. Новые процессы получения металла (металлургия железа): Учебник для вузов. — М.: Металлургия, 1994. — 320 с.
9. Иващенко В. П., Величко А. Г., Терещенко В. С. Прямое получение металла с применением низкотемпературной плазмы. — Днепропетровск: Системные технологии, 2002. — 254 с.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Поступила 16.01.2007