



УДК 669.094.1:66.046.5

## К ВОПРОСУ О ПЛАЗМЕННОМ ЖИДКОФАЗНОМ ВОССТАНОВЛЕНИИ ЖЕЛЕЗА ИЗ ОКСИДНОГО СЫРЬЯ

В. А. Шаповалов, Г. А. Мельник, Д. М. Жиров,  
А. А. Ждановский, К. А. Цыкуленко

Предложена схема плазменного жидкофазного восстановления железа из его оксидов. Показано, что содержание серы и фосфора в полученном продукте в несколько раз меньше допустимого для пердеельного чугуна.

Scheme of plasma liquid-phase reduction of iron from its oxides has been offered. It is shown that content of sulphur and phosphorus in the ready product is several times lower than the admissible content for pig iron.

*Ключевые слова:* восстановление; плазменный источник теплоты; железосодержащие материалы; железистый шлак

В настоящее время существует множество способов восстановления железа из расплавленных оксидов

[1–3]. Увеличению степени его восстановления и скорости протекания реакций способствует повышение температуры. Установлено, что наиболее эффективное достижение необходимых высоких температур обеспечивается при использовании плазменных источников теплоты [4, 5].

Во время протекания процесса восстановления активность оксида железа в рудно-шлаковом расплаве непрерывно снижается, что приводит к замедлению процесса, а в случае применения газовых восстановителей — к значительному повышению их расхода. Поддерживать высокую активность FeO в расплаве можно посредством непрерывной подачи железосодержащих материалов (ЖСМ). Поэтому представляет интерес исследование возможности жидкофазного восстановления железа из его оксидов с применением плазменного нагрева, а также изучение особенностей процесса с большим содержанием оксидов железа в шлаковом расплаве.

Опытные плавки выполняли на экспериментальном стенде (рисунок). В качестве плазмообразующего газа использовали аргон или воздух, а в качестве ЖСМ — окисленные окатыши, офлюсованный агломерат и промасленную окалину поставки ОАО «Криворожский горно-металлургический комбинат», а также металлизированные окатыши Оскольского электрометаллургического комбината. При проведении химического анализа в промасленной окалине определяли содержание серы, фосфора, углерода. Главной целью эксперимента с использованием окалины было выяснение возможности переработки предложенным способом мелкодисперсного сырья с большим содержанием влаги и масла. Химический состав ЖСМ представлен в табл. 1, режимы плавки — в табл. 2.

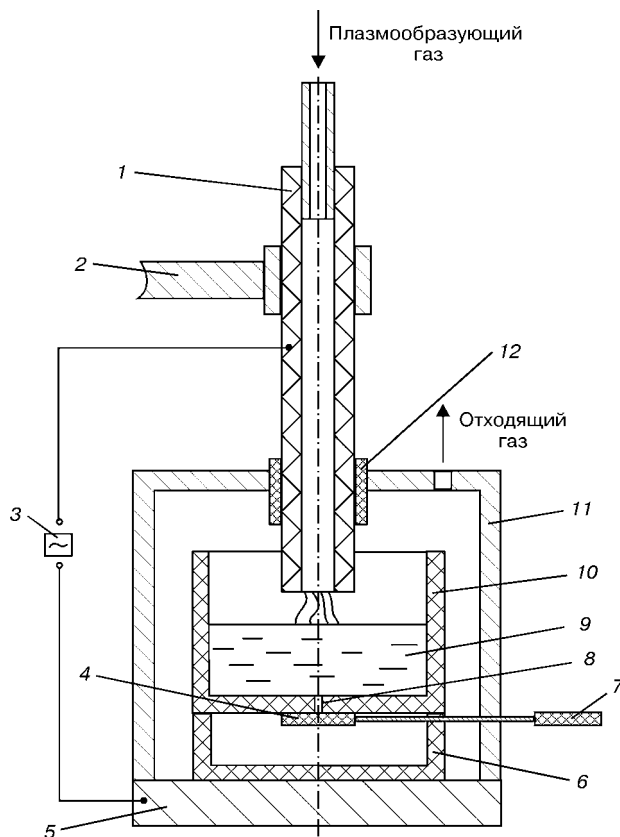


Схема экспериментального стенда: 1 — плазменный нагреватель прямого действия; 2 — механизм перемещения электрода; 3 — источник переменного тока; 4 — заглушка; 5 — платформа; 6 — графитовая изложница; 7 — ручка; 8 — выпускное отверстие; 9 — расплав; 10 — графитовый тигель; 11 — камера; 12 — изолятор

© В. А. ШАПОВАЛОВ, Г. А. МЕЛЬНИК, Д. М. ЖИРОВ, А. А. ЖДАНОВСКИЙ, К. А. ЦЫКУЛЕНКО, 2005



Таблица 1. Химический состав исходных ЖСМ

Вид ЖСМ	Массовая доля элементов в ЖСМ, %							
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	MnO	S	P	C
Окатыши металлизированные	1,94	0,65	0,21	0,47	0,06	0,004	0,029	0,760
Окатыши окисленные	9,18	0,32	0,87	0,37	0,12	0,039	0,007	0,062
Агломерат офлюсованный	8,86	1,13	2,65	1,50	0,36	0,030	0,048	0,093
Окалина промасленная	–	–	–	–	–	0,029	0,014	1,000

Примечания: 1. В ЖСМ соединение Fe<sub>x</sub>O<sub>y</sub> – основа. 2. В промасленной окалине содержится 35 % влаги и масла.

Таблица 2. Режим плавки

№ плавки	Вид ЖСМ	Ток дуги, А	Напряжение на дуге, В	Длина дуги, мм	Плазмообразующий газ	Продолжительность плавки, мин	Выход Fe, %	Масса ЖСМ, кг	Примечания
1	Окатыши металлизированные	1200	60	55	Аргон	27	79	6,0	
2	Окатыши окисленные	1250	50	57	»	30	74	3,0	+ 750 г коксика и 200 г CaO
3	Агломерат офлюсованный	1250	57	60	»	20	69	3,0	+ 600 г коксика
4	»	950	33	75	Воздух	40	76	5,13	С подачей порошкообразного графита через полость электрода
5	Окалина промасленная	300	30	22	»	26	45	2,15	В составе шихты 8 % порошкообразного графита и 14 % порошкообразного CaO

Таблица 3. Химический состав полученных продуктов

№ плавки	Массовая доля элементов, %											B	L <sub>S</sub>	L <sub>P</sub>
	в металле			в шлаке										
	C	S	P	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	MnO	S	P	Fe			
1	4,1	0,010	0,034	52,17	16,0	6,7	9,0	1,1	0,01	0,011	12,7	0,33	1,0	0,32
2	3,1	0,050	0,024	2,44	1,27	2,1	1,0	0,19	0,025	0,026	77,5	1,12	0,5	1,08
3	3,2	0,120	0,026	36,0	6,52	16,0	6,54	1,55	0,078	0,041	28,0	0,65	0,65	1,58
4	3,8	0,035	0,022	0,68	1,56	2,36	1,48	0,34	0,022	0,036	77,5	2,83	0,63	1,64
5	6,3	0,007	0,020	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

В плавках № 2, 3 и 5 восстановитель вводили в состав шихты в стехиометрическом количестве, в № 2 и 3 использовали коксик с содержанием 0,026 % S и 0,045 % P, а в № 5 – порошкообразный графит, полученный из электродного боя. В плавке № 4 такой же графит подавали в расплав вместе с плазмообразующим газом. Следует отметить, что плавки осуществляли в графитовом тигле, что не исключало возможности дополнительного науглероживания металла.

В плавке № 4 дуга зажглась от дна тигля, а шихтовые материалы находились в пространстве между нагревателем и внутренней стенкой тигля. По мере расплавления шихты нагреватель подыма-

ли, но дуга оставалась закрытой до полного расплавления ЖСМ. Во всех остальных плавках дуга сначала горела над слоем шихтовых материалов, а затем над поверхностью расплава. Отмечено, что в плавке № 4 дуга горела стабильнее, чем в других, что можно объяснить отсутствием обвалов шихты в зоне дуги.

Расплав через донное отверстие сливали в нагретую графитовую изложницу, когда равновесие между шлаком и металлом еще не было достигнуто. В полученных продуктах фазы имели четко выраженную границу. В табл. 3 представлен их химический состав.

Определены коэффициенты распределения серы L<sub>S</sub> и фосфора L<sub>P</sub> между шлаком и металлом:



$$L_s = \frac{(S)}{[S]}, \quad L_p = \frac{(P)}{[P]},$$

где (S), (P) — содержание соответствующих элементов в шлаке, а [S], [P] — в металле. Основность шлака рассчитывали по формуле

$$B = \frac{(CaO) + 1,5(MgO)}{(SiO_2) + 0,6(Al_2O_3)} \quad (1)$$

на основе выражения

$$B = \frac{n_{CaO} + n_{MgO} + n_{MnO}}{n_{SiO_2} + 2n_{P_2O_5} + n_{Al_2O_3} + 0,5n_{Fe_2O_3}},$$

где (CaO), (MgO), (SiO<sub>2</sub>) и (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) — содержание соответствующих оксидов в шлаке, мас. %; n — количество молей оксидов в 100 г шлака [6].

Формула (1) получена как рабочая для наших конкретных случаев, поэтому в ней не указаны MnO и P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> из-за их малых концентраций, а также Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, поскольку железо в шлаке находилось в виде монооксида.

Согласно работе [6], максимальный коэффициент активности монооксида железа достигается при основности шлака 1,8...2,0, хотя по мере увеличения содержания FeO при постоянной основности коэффициент активности уменьшается.

В статье [7] исследовано влияние основности шлаков на скорость восстановления железа из рудно-шлаковых расплавов твердым углеродом и показано, что при увеличении основности от 0,6 до 1,4 скорость восстановления железа непрерывно растет.

При основности менее 0,85 шлак характеризуется очень низкой обесфосфоривающей способностью [8]. Лишь при очень высоком содержании в нем монооксида железа возможна существенная дефосфорация металла. Возрастание основности шлака до 2,3 способствует повышению его обесфосфоривающей способности, а дальнейшее увеличение основности уже не оказывает существенного влияния на эту способность, однако рост содержания монооксида железа значительно повышает возможность дефосфорации металла шлаком. Следовательно, при основности шлака около 2 должны фиксироваться как его достаточно высокая обесфосфоривающая способность, так и наибольшая скорость восстановления.

Проведенные плавки показали, что при большом содержании монооксида железа в шлаке коэффициент распределения фосфора превышает 1 уже при основности 0,65, что согласуется с изложенным. Несколько «выпадают» результаты плавки № 2, причиной чего, по всей видимости, был слишком ранний слив металла.

Как следует из табл. 3, десульфурации металла шлаком в проведенных плавках не произошло. Однако содержание серы в полученном продукте меньше допустимого для передельного чугуна, что объясняется ее малым содержанием в исходном сырье. Но даже при повышенном содержании серы она может быть легко удалена [9].

Таким образом, следует определить оптимальную длительность пребывания металла в расплавленном состоянии, чтобы, с одной стороны, произошла его эффективная дефосфорация, а с другой, — сохранялась высокая производительность агрегата.

## Выводы

1. Показано, что в результате жидкофазной плазменной восстановительной плавки ЖСМ из железистого расплава можно получить металл с содержанием серы и фосфора в несколько раз меньшим допустимого для передельного чугуна. При

$B = \frac{(CaO) + 1,5(MgO)}{(SiO_2) + 0,6(Al_2O_3)} \geq 0,65$  процентное содержание фосфора в металле меньше, чем в шлаке.

2. Установлено, что дуга горит наиболее стабильно в режиме, когда она «закрыта» шихтовыми материалами до полного их расплавления.

3. Предложенный способ применим для переработки мелкодисперсного сырья с большим содержанием влаги и масла, например промасленной окалины.

4. Большие энергетические затраты можно объяснить «холодным стартом» и малой вместимостью тигля (6 кг).

1. Юсфин Ю. С., Гиммельфарб А. А., Пашков Н. Ф. Новые процессы получения металла (металлургия железа): Учеб. для вузов. — М.: Metallurgy, 1994. — 320 с.
2. Бондаренко Б. И., Шаповалов В. А., Гармаш Н. И. Теория и технология бескоксовой металлургии / Под ред. Б. И. Бондаренко. — Киев: Наук. думка, 2003. — 534 с.
3. Иващенко В. П., Величко А. Г., Терещенко В. С. Прямое получение металла с применением низкотемпературной плазмы. — Днепропетровск: Системные технологии, 2002. — 254 с.
4. Дембовский В. Плазменная металлургия. — М.: Metallurgy, 1981. — 280 с.
5. Лакомский В. И. Плазменнодуговой переплав / Под ред. акад. Б. Е. Патона. — Киев: Техніка, 1974. — 336 с.
6. Теоретические основы сталеплавильных процессов. Учебное пособие для вузов / Р. С. Айзатулов, П. С. Харлашин, Е. В. Протопопов, Л. Ю. Назюта. — М.: МИСиС, 2002. — 320 с.
7. Кондаков В. В., Рыжонков Д. И. Влияние основности на скорость восстановления железа из шлаковых расплавов твердым углеродом // Изв. вузов. Черная металлургия. — 1963. — № 1. — С. 17–21.
8. Крамаров А. Д. Производство стали в электропечах. — М.: Metallurgy, 1964. — 440 с.
9. Виспечное рафинирование чугуна и стали / И. И. Борнацкий, В. И. Мачикин, В. С. Живченко и др. — Киев: Техніка, 1979. — 168 с.

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

Поступила 06.12.2004