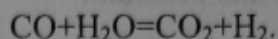


концентрации паров воды порядок реакции уменьшается. При 800–900°C он изменяется до единицы (при 3–5% H₂O) и до нуля при 10–15% H₂O. По мере повышения температуры при низких концентрациях H₂O (3–5%) порядок реакции несколько уменьшается, а при высоких — увеличивается.

Таким образом, при низких температурах (400–500°C) протекает реакция:



Для проверки методики определения состава генераторного газа были выполнены расчеты и сравнены результаты испытаний пилотной установки газификации угля с теоретическими.

В таблице 4 приведены теоретические и экспериментальные данные.

Таблица 4. Расчетный и экспериментальный состав генераторного газа, %

Состав	CO ₂	CO	H ₂	H ₂ O	N ₂	$K_p = \frac{[\text{CO}] \cdot [\text{H}_2\text{O}]}{[\text{CO}_2] \cdot [\text{H}_2]}$
Расчетный	5,26	26,5	11,2	4,32	53,4	1,94
Теоретический	8,81	24,9	9,09	5,99	55,6	1,86

Как видно из этой таблицы K_p теоретически составила 1,94, а по экспериментальным данным 1,86, то есть была получена достаточная сходимость расчетных и экспериментальных данных.

Список литературы

1. Гинзбург Д.Б. Газификация низкосортного топлива. — М.: Промстройиздат, 1950. — С. 29–31.
2. Костылев Н.А. Тепловые расчеты. Теория газификации, газогенераторы. — Томск: КУБУЧ, 1932. — С. 40.
3. Long F., Sykes K. Proceedings of the Royal Society, 1952. — v. 215. — P. 100–110.
4. Gadsby J. Proceedings of the Royal Society, 1946. — v. 187. — P. — 129–151.
5. Гольдштейн Н.Л. Краткий курс теории металлургических процессов. — Свердловск: Металлургиздат, 1961. — С. 105.

© Иванов А.И., Махов Г.Г., Безбородов Д.Л., Константинов Г.Е., 2002

ВАНЮКОВА Н.Д. (НМЕТАУ)

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА КАЧЕСТВО МЕТАЛИЗОВАННОГО ПРОДУКТА ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ ВОССТАНОВЛЕНИИ ОКАТЫШЕЙ

В последние годы разрабатывается новый процесс прямого получения железа из отходов металлургической промышленности и железных руд. В представленной работе изложены фундаментальные исследования основных факторов, определяющих такие явления, как восстановление, спекание, поведение окатышей при восстановлении, разбухание, разрушение и др.

Традиционная схема производства стали: коксохимическое производство — доменная печь — кислородный конвертер, является наиболее важной в настоящее время. Схема производства стали без коксохимического производства осуществлена в процес-

се получения жидкого металла по способу Корекс. Способ включает два агрегата: шахту и реактор, в котором происходит газификация углей и плавление металла, поступающего из шахты. В шахте железосодержащие материалы восстанавливаются поступающими из реактора газами [1].

Производство стали возможно также по схеме, которая включает получение металлизированного продукта прямым восстановлением, которое осуществляется газом или твердым восстановителем. Последнее происходит во вращающихся трубчатых печах и печах с вращающимся подом [2]. Обработка лома и жидкого чугуна может производиться и в других агрегатах, например в электропечах.

В последнее время получил развитие Инметко-процесс для получения губчатого железа из отходов производства специальных сталей. Процесс включает в себя три стадии: получение окатышей путем окомкования отходов с тонкоизмельченным углем и вяжущими добавками, высокотемпературное восстановление сырых окатышей в печи с вращающимся подом и плавка губчатого железа в дуговой электропечи [3].

Металлизированные окатыши для дуговых электропечей должны соответствовать определенным требованиям: содержание пустой породы в исходной руде менее 3%, золы в угле менее 8%, летучих в угле менее 20%, степень металлизации более 90%, содержание остаточного углерода 1,5–3,0%, содержание пыли ($-0,5$ мм) в готовом продукте менее 3%, фракции более 6,3 мм — более 90%.

С целью возможности применения Инметко-процесса для производства губчатого железа из железорудных концентратов были проведены исследования, касающиеся параметров процесса подготовки исходных материалов и их восстановления. В связи с тем, что высокотемпературному восстановлению подвергаются сырые окатыши, было исследовано влияние вяжущих добавок, прежде всего бентонита, в процессе окомкования и восстановления. Работы были проведены в исследовательском центре подготовки железных руд в г.Отфрезен (Германия).

В качестве исходных материалов использовали гематитовую железную руду Хоспет (Индия): $Fe_{об}$ — 67,0%, SiO_2 — 1,7%; вьетнамский антрацит: зола — 6,2%; летучие — 6,7%; сера — 0,47%; связующие: бентонит и перидур. Железную руду измельчали и получали концентрат с поверхностью 1200 и 2000 $см^2/г$. Установка для исследования включала нагревательную печь для обжига рудоугольных окатышей с программным регулированием температурного режима термической обработки и с автоматическими газоанализаторами для контроля состава отходящего газа (рис. 1).

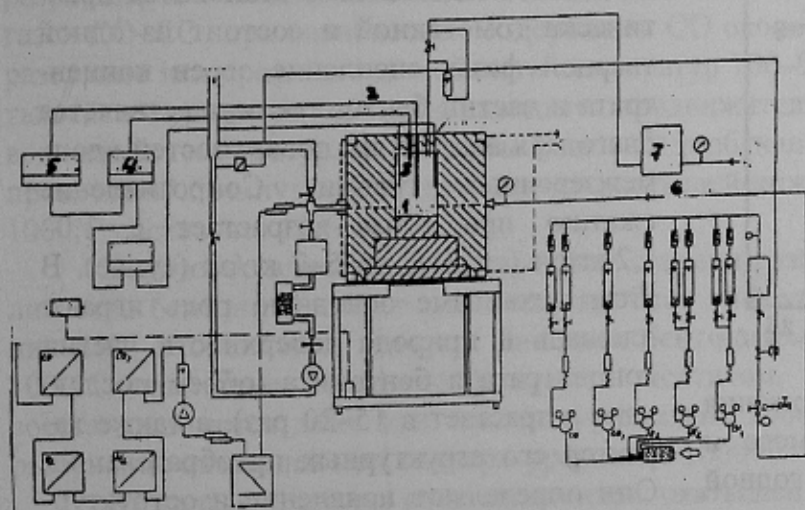


Рис. 1. Экспериментальная установка для исследования высокотемпературного восстановления руднотопливных окатышей: 1 — проба; 2 — температура пробы; 3 — температура нагревательного элемента; 4 — регулятор температур; 5 — регулятор температурных программ; 6 — газ-восстановитель; 7 — регулятор объема газа

Исследовали следующие факторы, влияющие на прочность металлизированных окатышей, степень их восстановления, содержание остаточного углерода в верхнем и нижнем слое: содержание бентонита от 0,5 до 2,5%, содержание перидура от 0 до 1%, содержание углерода 10 и 15%, крупность угля: менее 25 мкм и более 25 мкм, крупность окатышей: 8–12 мм; 8–10 мм; 11,2–12,5 мм; 10–12 мм; 16–19 мм; 20–25 мм.

Влияние содержания бентонита. В качестве связующих добавок при получении рудугольных окатышей применяли бентонит и перидур. Расход перидура был постоянным и составлял 0,3%. Расход бентонита изменялся от 0,5 до 2,5%. Влияние расхода бентонита на выход годных металлизированных окатышей и изменение их объема приведено на рис. 2–4. Во всех случаях увеличение расхода бентонита приводит к повышению выхода годной фракции, которая может достигать более 95% (в нижнем слое). В верхнем слое он составил во всех случаях 100%. Это возможно при расходе бентонита от 1,0 до 1,5%, когда размер окатышей находится в узком интервале крупности (10–12,5 мм; 8–10 мм), и они получены из тонкоизмельченного концентрата с поверхностью 2000 см²/г. При уменьшении поверхности концентрата до 1200 см²/г и увеличении диапазона крупности окатышей (8–12,5 мм), выход годной фракции снижается до 50–60% при расходе бентонита 1,0–1,5% и повышается до 75% при расходе бентонита 2,5%. Снижение содержания углерода в шихте с 15% до 10% повышает выход годного до 95% (в нижнем слое) при расходе бентонита 2,5%.

- | | | | | |
|-------|------------|-------|--------|--------------------|
| 1 - ⊗ | 10-12,5 мм | 15% C | S=2000 | см ² /г |
| 2 - ○ | 8-12,5 мм | 15% C | S=1200 | см ² /г |
| 3 - ● | 8-12,5 мм | 10% C | S=1200 | см ² /г |
| 4 - x | 10-12,5 мм | 15% C | S=1200 | см ² /г |
| 5 - Δ | 8-10 мм | 15% C | S=2000 | см ² /г |

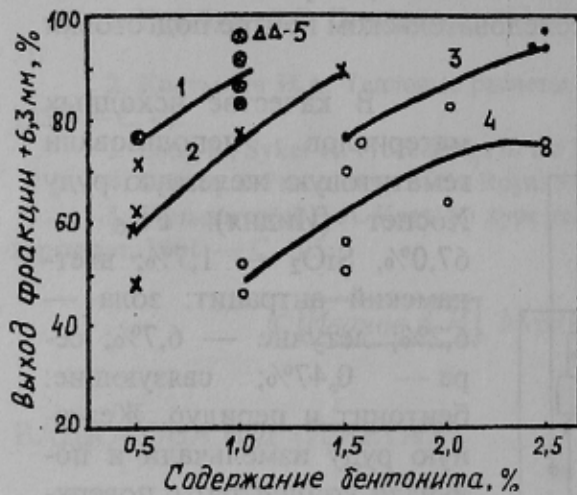


Рис. 2. Влияние содержания бентонита в окатышах, их размера и содержания углерода на выход годной фракции губчатого железа

Улучшение физических свойств металлизированных окатышей при увеличении расхода бентонита в шихту, связано, очевидно, с фазовыми превращениями монтмориллонита (основного минерала бентонита) при нагреве. В высушенном и нагретом до 300–400°C нефлюсованном окатыше, когда система становится практически гомогенной и состоит из одной твердой фазы, сцепление зерен концентрата и частиц бентонита осуществляется благодаря адгезии их поверхностей вдоль межзеренных границ. Сопротивление сжатию при этом возрастает с 1,0–1,2 кг/ок (сырые) до 5–7 кг/ок (сухие). В этом механизме основную роль играют площадь и природа поверхности частиц концентрата и бентонита (объем последнего возрастает в 15–20 раз), а также характер его структурных преобразований. Они определяют появление изоструктурных компонентов твердой фазы, что, в конечном счете, ведет к реализации эпитаксических сростаний.

Существенную роль оказывает появление аморфных и стеклообразующих фаз, что способствует высокотемпературному спеканию железорудного концентрата. В результате структурных преобразований бентонита в температурном интервале 400–1100°C образующиеся фазы зависят также от степени окисленности частиц железорудного концентрата. Обнаруживается более высокая сохранность магнетита в контакте с глинистыми минералами [4]. Таким образом, бентонит улучшает каче-

ство не только сырых и сухих окатышей, но и прочность окатышей в процессе высокотемпературного восстановления.

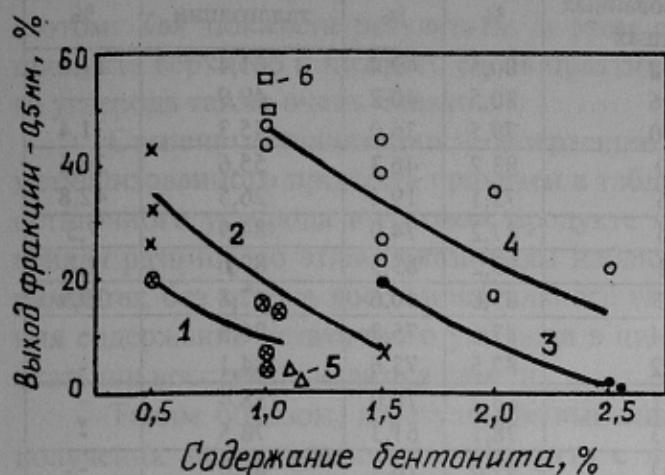


Рис. 3. Влияние размера окатышей и содержания в них бентонита и углерода на выход мелочи в готовом продукте

В процессе высокотемпературного восстановления слоя в два окатыша в верхнем слое окатыши уменьшаются в объеме, а окатыши нижнего слоя разбухали. При уменьшении расхода бентонита с 1,5% до 0,5% объем окатышей нижнего слоя увеличивался с 12% до 72%, а усадка в верхнем слое изменялась с 7,0% до 40% (рис. 4).

Противоположные эффекты в нижнем и верхнем слое, очевидно, зависят от условий восстановления. Причины потери прочности, разбухания и разрушения окатышей при восстановлении хорошо известны [5]. Это происходит в результате анизотропии скорости восстановления, пере-

хода от гексагональной решетки гематита в кубическую для магнетита. Разбухание окатышей происходит в результате возникновения напряжений в пограничном слое и увеличения объема поверхностного слоя. При дальнейшем восстановлении образуется пористый вюстит, на его поверхности появляется игольчатое железо, и объем окатыша увеличивается. Минералогическое исследование окатышей верхнего и нижнего слоя показало, что рост игл и усов железа происходит только в окатышах нижнего слоя. Образование игл железа зависит от состава газа-восстановителя и температуры. В смеси газов CO-CO₂ при равновесном содержании CO около границы фаз железо-вюстит образование игл проявляется в области температур 700-900°C. Так как нижний слой окатышей, в отличие от верхнего, находится продолжительное время в области этих составов газа и температур, то это и вызывает их разбухание. Так при суммарном времени процесса 47,5 минут, время пребывания окатышей нижнего слоя при температуре ниже 1000°C составляет 12,5 минут.

Некоторое влияние на уменьшение степени разбухания окатышей оказывает количество бентонита, вводимого в шихту. Этот эффект связан с увеличением содержания SiO₂ в окатышах, который вносится бентонитом. В интервале температур 600-1000°C кремнезем, взаимодействуя с вюститом, образует фаялит. Фаялит не восстанавливается даже при температурах выше 1000°C и тем самым предотвращает разбухание окатышей при температурах ниже 1000°C.

Химический анализ восстановленных окатышей приведен в таблице.

Влияние содержания перидура. Эксперименты № 105, 106, 110, 111, 115, 117 были проведены с антрацитом и № 128 с графитом. Из приведенных данных видно, что отсутствие перидура в шихте не оказывает влияния на физические свойства и степень металлизации продукта. Окатыши с графитом показали более низкую прочность, чем с антрацитом.

Влияние содержания углерода. Эксперименты № 94-97. Для достижения необходимой степени металлизации содержание углерода в сырых окатышах должно быть не менее 15%.

Таблица. Химический анализ восстановленных окатышей

№ опыта	Положение в слое	Содержание углерода		Fe _{об.} %	Fe _{мет.} %	Степень металлизации	FeO, %
		В сырых окатышах	В металлизированных окатышах				
94	Верх	10	0,18	80,5	49,4	61,4	21,8
	Низ		2,96	80,5	40,2	49,9	-
	Пыль		2,90	79,5	36,0	45,3	31,4
95	Средний	10	1,0	83,2	46,3	55,6	26,6
	Пыль		7,5	73,1	19,4	26,5	42,8
98	Средний	15	5,4	87,2	74,0	84,9	7,5
101	Средний	15	4,1	93,2	83,5	89,6	2,1
102	Средний	10	0,2	85,0	40,6	47,8	30,9
116	Верх	15	0,74	87,6	75,8	86,5	-
	Низ		0,52	87,5	73,6	84,1	-
117	Верх	15	1,71	88,2	78,0	88,4	-
	Низ		9,23	78,1	61,3	78,5	-
118	Верх	15	0,63	89,0	76,4	85,8	-
	Низ		9,57	80,1	66,8	83,4	-
126	Верх	15	1,91	88,3	77,1	87,3	-
	Низ		11,65	74,8	54,6	73,0	-
127	Верх	15	1,04	82,1	56,0	68,1	-
	Низ		8,99	70,3	27,3	38,8	-
128	Верх	15	2,80	78,5	45,0	57,3	-
	Низ		11,62	64,8	10,7	16,5	-
129	Верх	15	1,25	84,7	69,2	81,7	-
	Низ		9,65	72,1	38,1	52,9	-
130	Верх	15	3,78	82,4	62,6	76,0	-
	Низ		10,53	71,8	37,2	51,8	-

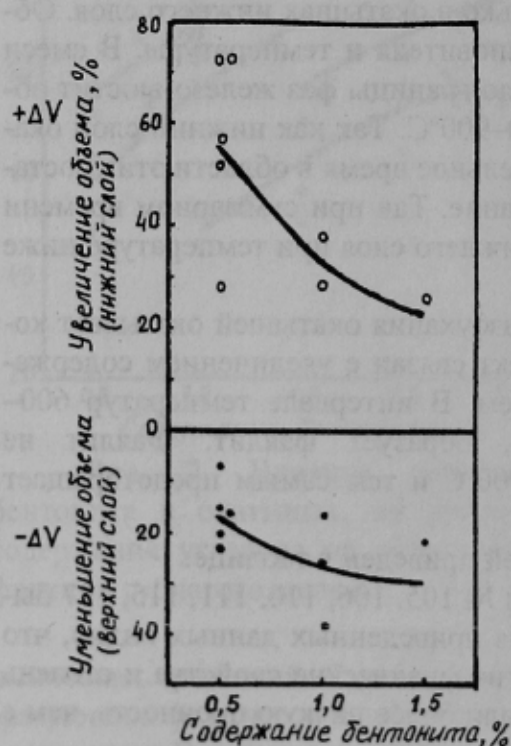


Рис. 4. Изменение объема окатышей при высокотемпературном восстановлении: размер окатыша 10–12,5 мм, содержание углерода — 15%

Влияние вида угля и его крупности.

Эксперименты № 127, 129, 130, 125, 126, 108, 109. Анализ результатов исследования показывает, что лучшие результаты по прочности окатышей получены с крупностью топлива более 25 мкм. Получали окатыши с антрацитом, графитом и коксовой мелочью. Анализ результатов показывает, что удовлетворительные значения прочности и степени металлизации получаются при использовании антрацита. При использовании коксика и графита прочность и степень металлизации окатышей снижается. Угли с высоким содержанием летучих веществ снижают прочность и степень металлизации.

Влияние крупности окатышей.

В экспериментах № 103, 104 восстанавливали окатыши размером 20–25 мм и 16–19 мм, загруженные слоем в один окатыш. Основные эксперименты были выполнены с окатышами размером 8–12,5 мм и 10–12,5 мм. Результаты исследования показали низкую прочность и низкую степень

металлизации окатышей крупностью от 16 до 25 мм. Крупность окатышей должна находиться в узком интервале 8–10 мм и 10–12,5 мм. Во время эксперимента № 116 осуществляли отток продуктов восстановления путем продува реакционного пространства азотом. Как показали результаты, в этом случае степень металлизации и прочность продукта верхнего и нижнего слоев практически не отличается, содержания остаточного углерода также очень близки.

Степень металлизации и содержание остаточного углерода. Химический анализ металлизированного продукта приведен в таблице 2. Степень металлизации и содержание остаточного углерода в готовом продукте изменяется в широком интервале. Существенная разница по этим показателям наблюдается в верхнем и нижнем слое. В экспериментах без оттока восстановительного газа даже при высокой степени восстановления содержание остаточного углерода в нижнем слое выше. Очевидно, в нижнем слое окатыши восстанавливаются газами.

Таким образом, в результате выполненных исследований установлено, что для получения металлизированного продукта с показателями качества, удовлетворяющими требованиям электросталеплавильного производства необходимо выдерживать следующие технологические рекомендации:

- железорудный концентрат с поверхностью не менее $1200 \text{ см}^2/\text{г}$;
- восстановитель — низкочольный антрацит в количестве 15%, крупностью около 25 мкм;
- связующее — бентонит, около 1,5%;
- крупность окатышей — 10–12,5 мм;
- высокотемпературное восстановление необходимо проводить с продувом слоя азотом.

Список литературы

1. Gudenau H.W. Einfluß der Eisenmodifikation bei der direkten Stahlerzeugung — Vortrag Metallurgie und Werkstoffwissenschaften. — 22.04.1987. — TU Claustahl.
2. Stand und Entwicklung zur Direktreduktion und Schmelzreduktion von Eisenerz / Schubert K.H., Lungen H.B., Steffen R. // Stahl und Eisen, 1996. — № 8. — S. 71–79.
3. A new generation of rotary hearth furnace technology for coal based DRI production / Degel R., Fontana P., Lehmkuhler H. // Stahl und Eisen, 2000. — № 2. — S. 33–40.
4. Изменения палыгорскита при нагревании / Куковский Е.Г., Островская А.Б., Драч Г.А., Шлигун А.А. // Сб. «Конституция и свойства минералов». — К.: Наукова думка, 1967. — вып. 2. — С. 24.
5. Структура и разрушение окатышей при восстановлении / Алексеев Л.Ф., Горбачев В.А., Кудинов Д.З., Шаврин С.В. — М.: Наука, 1983. — 80 с.

© Ванюкова Н.Д., 2002

ЗБОРЩИК А.М. (ДонНТУ)

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ ДЛЯ ВНЕДОМЕННОЙ ДЕСУЛЬФУРАЦИИ ЧУГУНА

Выполнен анализ удельных расходов и стоимости десульфуратора при инжестировании гранулированного магния в чугуны через фурмы с испарительными камерами и подаче магния в виде порошковой проволоки. Показано, что применяемая в настоящее время технология обработки чугуна порошковой проволокой со смесью металли-