

Д.А. Степаненко

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ СОСТАВА ПЕРВИЧНОГО ШЛАКОВОГО РАСПЛАВА ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ОКАТЫШЕЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ИХ МИНЕРАЛОГИЧЕСКОГО СОСТАВА

Аннотация. Изложен подход к решению задачи прогнозирования состава первичного шлакового расплава в процессе агрегатных и фазовых превращений железорудных окатышей в условиях доменной плавки. Для оперативного контроля качества первичных расплавов в составе АСУ ТП предложены модели с учетом минералогического состава окатышей.

Ключевые слова: прогнозирование, автоматизированная система, окатыши, минералогия, первичный шлаковый расплав.

Актуальность

Учитывая важность влияния процессов шлакообразования на состав и свойства продуктов плавки, эффективность технологического режима, его стабильность, в Институте черной металлургии НАНУ разработана и постоянно совершенствуется система контроля и управления шлаковым режимом «Шлак» [1]. Система реализует научно обоснованные подходы к установлению наиболее рациональных показателей шлакового режима доменной плавки во взаимной согласованности технологических и физико-химических параметров формирующихся в ходе агрегатных и фазовых превращений сырья в процессе плавки.

В процессе агрегатных и фазовых превращений сырья в условиях доменной плавки различают три стадии шлакообразования [2]:

- первичный шлак (первичный расплав) представляет собой смесь компонентов SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , MnO , FeO и других оксидов, находящихся в тесном контакте, которые при нагреве достигли достаточной температуры для сплавления и образования жидкой массы;

- промежуточный шлак является продуктом преобразования первичных шлаков при поступательном повышении температуры, снижении в них содержания FeO и MnO и повышении CaO и MgO с

полным растворением всех оксидов и сернистых соединений, находящихся в составе железосодержащих материалов при сокращении определенной доли SiO_2 , MnO , P_2O_5 и др. за счет восстановления и перехода соответствующих элементов в чугун;

- конечный шлак является продуктом присоединения к промежуточному шлаку золы кокса после растворения в нем серы, измененный в результате окислительных и вторичных восстановительных процессов в фурменной зоне и нижней части металлоприемника.

Характерной особенностью первичных шлаковых расплавов является определенное, иногда значительное, содержание невосстановленного косвенным путем (газообразными восстановителями CO и H_2) железа в виде FeO [3].

Если содержание основных шлакообразующих компонентов (CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , MgO) в первичных шлаках довольно просто вычисляется по составу шихты балансовым методом, то вычисление FeO является проблематичным. Важность определения содержания FeO в первичном шлаке обусловлена существенным его влиянием на физико-химические свойства (вязкость, поверхностное натяжение и др.), которые сказываются на показателях работы печи и ее энергетических затратах (прямое восстановление железа из FeO первичного шлакового расплава).

Изучению свойств первичных доменных шлаков посвящены работы ряда авторов [3-5]. При этом, несмотря на различие составов исследованных групп шлаков (высокоглиноземистых, магнезиальных, кислых, основных и т.д.), практически однозначным во всех исследованиях является вывод о значительном разжижающем влиянии FeO . Так, в работе [4] при изучении вязкости шлаков в системе $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ с добавками FeO показано, что при различных содержаниях Al_2O_3 и MgO , различной основности и различных температурах с увеличением содержания FeO в шлаках от 0 до 12% вязкость этих шлаков уменьшается в 1,5 – 5 раз.

Из выше отмеченного следует, что при оценке свойств первичных шлаковых расплавов и энергетических затрат доменной плавки на прямое восстановление железа лимитирующим звеном является определение количества FeO в первичных шлаках.

Цель

Разработка прогнозных моделей для оценки состава первичных шлаковых расплавов, образующихся в процессе агрегатных и фазовых превращений железорудных окатышей в условиях доменной плавки.

Изложение основных материалов исследования

В настоящее время в шихте доменной печи используется несколько видов подготовленного сырья с разными металлургическими свойствами, что усложняет условия доменной плавки, приводя к увеличению протяженности зоны вязко-пластичного состояния материалов. В связи с этим представляется необходимым, рассматривать вопрос первичного шлакообразования с позиции анализа минералогического состава и структуры, отдельно взятых железорудных материалов (окатыш, агломерат) и их поведения в условиях близких к доменной плавке.

В настоящей работе описан подход к прогнозированию состава первичного шлака, образующегося при использовании окатышей в составе доменной шихты.

При производстве окатышей различают два их типа: окатыши естественной основности (неофлюсованные) и офлюсованные окатыши.

Состав силикатной связки неофлюсованных окатышей характеризуется следующим химическим составом:

Таблица 1

Силикатные связи неофлюсованных окатышей по данным [6]*

Компонент	Содержание (%) при температуре обжига, °С			
	1150	1200	1250	1300-1350
Fe _{общ.}	15,4±1,4	11,2±0,5	11,2±0,5	11,4±0,4
SiO ₂	65,0±3,0	70,0±2,0	70,0±2,0	72,0±2,0
MgO	4,7±1,7	4,2±0,7	4,2±0,7	1,0±0,3
K ₂ O	9,0±1,0	9,8±0,8	9,2±0,8	9,7±0,7

*- По данным рентгеноспектрального микрозондирования.

Офлюсованные железорудные окатыши по сравнению с неофлюсованными представляют собой более сложную систему. Если в окатышах естественной основности направление минералообразования и конечный состав окатышей заложены в вещественном составе

концентрата, то в офлюсованных направлении минералообразования и конечный состав окатышей зависят от ряда переменных, таких, как фазовый состав концентрата, состав флюса и степень офлюсования окатышей (CaO/SiO_2).

Конечный состав силикатного расплава офлюсованных окатышей формируется в узком интервале температур 1250...1270 °С [6]. При этих температурах офлюсованные окатыши представляют собой двухфазную систему, где гематит находится в твердом (пластическом), а силикатный расплав в жидком состояниях. На этом этапе силикатный расплав представляет собой трехкомпонентный шлак. В его состав переходит весь кремний минералов вмещающих пород, кальций флюса и частично железо концентрата.

Для офлюсованных известняком окатышей, получаемых окислительным обжигом, характерно отсутствие шлаковых компонентов в решетке гематита. Поэтому все шлаковые компоненты CaO , SiO_2 и др., находящиеся при максимальных температурах обжига в расплаве, остаются в силикатной связке, которая образуется в момент охлаждения окатышей. Такой избирательный механизм минералообразования, когда основная рудная фаза не растворяет в своей решетке шлаковых компонентов, являясь как бы инертной по отношению к силикатному расплаву, а все шлаковые компоненты переходят сначала в расплав, а при охлаждении целиком в силикатную связку, свойствен окатышам, офлюсованным известняком. Связки офлюсованных окатышей из руд магнетитовых кварцитов располагаются в обширном поле кристаллизации волластонита системы $\text{CaO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ [6].

С целью количественной оценки содержания железа в силикатной связке проанализирована связь основности различных окатышей из концентратов железистых кварцитов (МихГок, ДГОК и ЛебГОК(1)) по данным [6] (рис. 1).

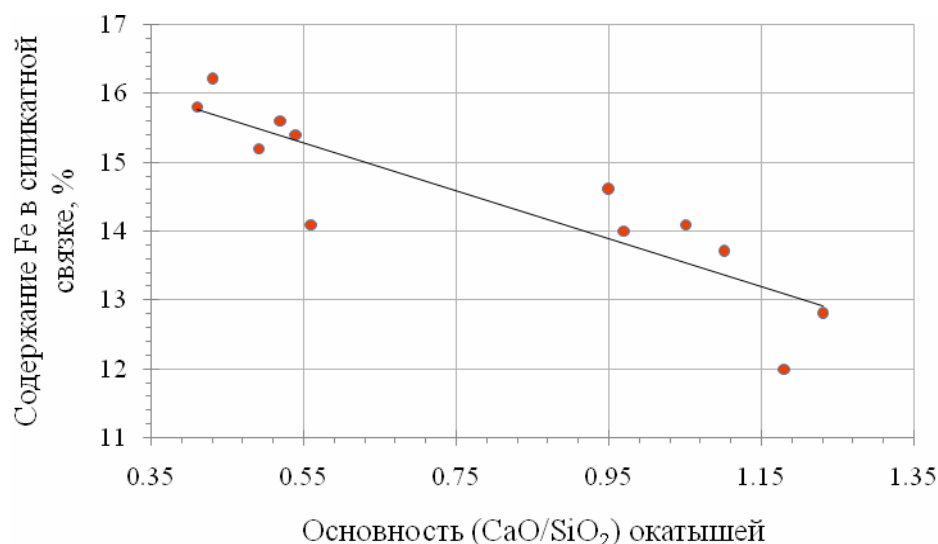


Рисунок 1 - Связь основности (CaO/SiO₂) окатышей с содержанием железа (Fe) в силикатной связке по данным [6]

Из анализа данных следует (рис. 1), что повышение основности силикатной связки и, соответственно окатышей в интервале значений CaO/SiO₂, способствует снижению содержания железа в связке.

Из установленной связи вытекает следующая зависимость:

$$Fe = -3,4811 \cdot \left(\frac{CaO}{SiO_2} \right) + 17,194, \quad R^2 = 0,7784, \quad (1)$$

где: Fe – содержание железа в силикатной связке офлюсованных окатышей, %; CaO/SiO₂ – основность окатышей.

По данным работы [6] количество силикатной связки в окатышах определяется их основностью и химическим составом железорудного концентрата (табл. 2)

Таблица 2

Количество силикатной связки в окатышах из концентратов Лебединского ГОКа

Содержание в концентрате, %		Количество связки, % при основности					
Fe	SiO ₂	0,1	0,3	0,5	1	1,2	1,5
65,3	7,8	4	13,2	14,6	18	19	21,7
68	4,7	3	9	9,8	13,4	15	17
69,4	2,8	2	5,8	6,4	7,9	9,2	10
70,4	1,8	1,5	4	4,3	5,1	5,7	6,6

Из анализа данных табл. 2 следует, что повышение основности окатышей и содержания в концентрате SiO_2 способствует повышению содержания силикатной связки в окатыше, данная взаимосвязь описывается уравнением:

$$m = -3,21831 + 1,748455 \cdot \text{SiO}_2 + 6,74174 \cdot \left(\frac{\text{CaO}}{\text{SiO}_2} \right), R^2 = 0,85 \quad (2)$$

где m – количество силикатной связки в окатыше, %; SiO_2 – содержание оксида кремния в окатышах, %; CaO/SiO_2 – основность окатышей.

Полученные модели реализованы в алгоритмических и программных средствах автоматизированной системы контроля и управления шлаковым режимом доменной плавки «Шлак» (рис.1).

Печь №2
Наименование расчета:

Наименование	Вес, тн	SiO2	Al2O3	CaO	MgO	MnO	S	Fe	FeO	Feмет	Влага	Вынос
КОКС	7.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.150	0.00	0.00	0.00	5.1	0.0
З КОКСА	0.76	45.90	22.85	3.65	1.58	0.09	0.640	13.40	0.00	0.00	0.0	0.0
ОКАТЫШИ ЦРГОК	3.00	4.13	2.56	1.24	2.42	0.23	0.029	60.20	3.60	0.00	0.0	0.0
ЖЕЛЕЗНАЯ РУДА	2.00	19.20	0.48	0.90	0.22	0.04	0.023	54.00	2.40	0.00	0.0	0.0
АГЛОМЕРАТ	19.00	8.86	0.79	11.35	0.90	0.10	0.040	54.46	13.50	0.00	2.6	0.0
ИЗВЕСТНЯК	0.38	0.30	0.27	54.02	0.81	0.00	0.090	0.76	0.00	0.00	0.0	0.0
Всего (тонны):	TPod	2.50	0.41	2.38	0.26	0.03	0.09	13.07	2.65	0.00		
Всего (%):		10.40	1.70	9.93	1.08	0.11	0.36	54.32	11.03	0.00		

2 КОКСА, % = 11.50 Пробы кокса: M25 = 87.5 ; M10 = 7.6 Кол-во подач: 8. Из них промывочных: 0.

Показатели шихты: De = -3.427 Коэффициент газа: Дутье: Содержание O2 (%) = 22.5
 Fe2O3 = 65.401 Ro = 0.750 Давление (атм) = 1.41 CO2 (%) = 16.03 Расход пр. газа (м3/мин) = 162.4
 Feобн. = 54.32 Dde = -1.011 CO (%) = 24.34 Температура дутья (°C) = 1147
 CaO/SiO2 = 0.955 M25 = 87.500 Температура (°C) = 110.0 Давление дутья (атм) = 2.50
 (CaO+MgO)/SiO2 = 1.058 Доли перехода в шлак: Влажность дутья (г/м3) = 8.16
 Расчетные показатели технологии: Ls1 = 0.91632 Lmp = 0.23491 Ls = 0.96607 LFe = 0.00062
 Степень испог. газа (доли) = 0.397
 Расход топлива на 1кг СФ = 0.283
 Длина фурменной зоны (м) = 1.509
 Рудная нагрузка = 3.483
 Температура горения = 2103

Вес, тн	S	P	C	Fe
13.817	0.708	0.115	0.021	0.082
4.540				94.534

Вес, тн	SiO2	Al2O3	CaO	MgO	MnO	FeO	S
6.792	31.670	3.440	34.761	3.631	0.386	24.909	1.202
5.448	42.074	7.492	43.845	4.748	0.116	0.190	1.534

Выход шлака: 394.313 кг/тн

Наименование	Размер-ти	Первичный	Конечный
1. CaO/SiO2		1.098	1.042
2. (CaO+MgO)/SiO2		1.212	1.155
3. Al2O3/MgO		0.947	1.578
4. Коэфф. распр. серы Lsфакт.			73.048
5. Коэфф. распр. серы Lsравн.			31.252
6. Степень достижения равновесия	%		233.734
7. Серопоглощательная способность шлака			9.150
8. физико-химический эквивалент шлака		-3.178	-2.364
9. Стехиометрия шлака		0.749	0.696
10. Температура начала фильтрации	°C	1347.327	
11. Температура максимальной фильтрации	°C	1494.192	
12. Вязкость шлака при 1300°C	па,сек	0.409	
13. Вязкость шлака при 1450°C	па,сек		0.352
14. Вязкость шлака при 1500°C	па,сек		0.247
15. Вязкость шлака при 1550°C	па,сек		0.177
16. Поверхностное натяжение при 1300°C	мН/м	349.808	
17. Поверхностное натяжение при 1500°C	мН/м		420.719
18. Энтальпия	кДж/кг		1827.504
19. Температура начала плавления	град°С	1198.823	1218.276
20. Температура начала кристаллизации	град°С		1312.694

Рисунок 2 - Печатная форма результата расчета системы контроля и управления шлаковым режимом доменной плавки «Шлак»

Выводы:

1. Показана важность учета минералогического состава железорудных материалов, в частности окатышей, при описании процесса формирования первичного шлакового расплава в условиях доменной плавки;

2. Установлена связь основности окатышей с содержанием в составе их силикатной связки железа, которое в условиях доменной плавки входит в состав шлаковой связки представленной в виде трехкомпонентной системы $\text{CaO-Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$. Предложена соответствующая прогнозная модель;

3. Из анализа минералогического и фазового состава окатышей установлены связи количества силикатной фазы в окатышах от содержания в них кремнезема и основности и предложена соответствующая прогнозная модель;

4. Полученные модели реализованы в алгоритмических и программных средствах автоматизированной системы контроля и управления шлаковым режимом доменной плавки «Шлак».

ЛИТЕРАТУРА

1. Физико-химические основы создания системы контроля и управления шлаковым режимом доменной печи в изменяющихся шихтовых и технологических условиях / Д.Н. Тогобицкая, А.Ф. Хамхотько, А.И. Белькова, П.И. Оторвин // Теория и практика производства чугуна: Тр. МНТК. – Кривой Рог, 2004г. – С. 504- 508.
2. Жило Н.Л. Формирование и свойства доменных шлаков. - М.: Metallurgia, 1974. - 120 с.
3. Гиммельфарб А. А.К вопросу о выборе оптимального состава первичного шлака доменной плавки / А. А. Гиммельфарб // Сб. "Шлаковый режим доменных печей". -М.: Metallurgia. -1967. -С.84-98.
4. Физико-химические и металлургические свойства доменных шлаков в четвертной системе $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ с добавками FeO / Т.И. Кухтин, Н.Е. Дунаев, Ж.Е. Слепцов [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. -1985. -№8. -С.17-21.
5. Гиммельфарб А.А. Вязкость шлаков четырехкомпонентной системы $\text{CaO-SiO}_2\text{-FeO-Al}_2\text{O}_3$ / А.А. Гиммельфарб //Металлы. -1968. -№2. -С.59-70.
6. Петрография и минералогия железорудного сырья: Учебное пособие для вузов / Малышева Т.Я., Долицкая О.А. - М.: МИСИС, 2004. - 424 с.