

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОСФОРАЦИИ МЕТАЛЛА В КОНВЕРТОРНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ОКИСЛЕННОСТИ ШЛАКА

Воробьев¹ Кирилл Владимирович, студент
Шевченко¹ Олег Игоревич, д-р техн. наук, доц.
Метелкин² Анатолий Алексеевич, канд. техн. наук, доц.
E-mail: ykvnv@mail.ru

1 – НТИ (филиал) УрФУ
г. Нижний Тагил, РФ
2 – УрФУ
г. Екатеринбург, РФ

Аннотация. Представлены расчеты дефосфорации металла (полупродукта) в конвертерном производстве в зависимости от окисленности шлака с использованием полимерной модели. Исследования проведены на основании производственных данных АО «ЕВРАЗ НТМК». Цель работы – получить высокоокисленный, жидкоподвижный, гомогенный шлак для успешной дефосфорации стали.

Ключевые слова. Дефосфорация стали, шлакообразующие материалы, кислородно-конвертерное производство, шлак, полупродукт.

Кислородно-конвертерный способ получения стали является флагманом и обеспечивает выплавку большей части мирового объема металла. В данном агрегате решаются наиболее сложные технологические задачи, такие как достижение заданных температур в конвертере, необходимое содержания углерода в стали и удаление через шлакообразование вредных примесей [1].

В конвертерном цехе № 1 АО «ЕВРАЗ НТМК» выплавляют высококачественные марки стали, в т. ч. и транспортного назначения, с жесткими ограничениями по фосфору.

Состав шлака оказывает значительное влияние на удаление фосфора из металла. В шлаке содержатся оксиды следующих групп: основные – CaO, FeO, MnO, MgO, кислотные – SiO₂, Fe₂O₃, P₂O₅ и амфотерные – Al₂O₃ [2, 3].

Необходимо определить влияние химического состава системы оксидов на процесс дефосфорации при переделе полупродукта в конвертерном производстве стали.

Для исследований рафинирующих свойств шлака были взяты производственные данные более 80000 плавов полупродукта при переработке дуплекс-процессом в конвертерном цехе № 1 АО «ЕВРАЗ НТМК» за 2016–2018 гг., в которые входят:

- химический состав полупродукта;
- экспресс-анализ стали на повалке конвертера;
- химический состав конвертерных шлаков;
- шлакообразующие материалы, отдаваемые на плавку в конвертере;
- вес заваливаемого стального лома и заливаемого чугуна;
- вес сливаемой стали в сталеразливочном ковше.

Из массива данных были исключены плавки с додувкой.

Металло-полупродукт содержал углерод и следы Si, Mn, которые были удалены при первом переделе при деванадании чугуна, поэтому их влияние на общий прирост оксидов незначителен и учитывать их в общем балансе шлака нецелесообразно. Химический состав полупродукта представлен в табл. 1 [4].

Таблица 1

Химический состав полупродукта, масс., %

C	Si	Mn	S	P	V
3,014	0,02	0,038	0,021	0,05	0,04

Для наведения высокоосновного рафинированного шлака в начале плавки в конвертер вводят различные шлакообразующие материалы, состав которых представлен в табл. 2 [4].

Таблица 2

Состав шлакообразующих материалов, масс., %

Материалы	Содержание оксидов в материалах, %					
	CaO	SiO ₂	MgO	MnO	FeO	Al ₂ O ₃
ОКД*	2,5	51	1,5	0	0	22,5
Mn-агломерат	4	16,5	1	40	0	0
Известь	94	1,5	0,5	0	0	0
ФОМИ**	21	4	63	0	8	0

* – обожженная кремнеземисто содержащая добавка;

** – флюс обожженный магниезильно известковый.

Содержание оксидов железа в шлаке в основном зависит от содержания углерода в металле и может быть приближенно определено по формуле [5]:

$$\sum \text{FeO} = 12 + \frac{0,9}{[\text{C}]} \quad (1)$$

Обработав предоставленные данные, проведя теоретический расчет шлаков, включающий в себя шлакообразующие материалы, FeO, содержание углерода на повалке конвертера, получили средние значения химического состава шлаков, которые представлены в табл. 3 [6].

Таблица 3

Среднее значение химического состава шлаков, %

CaO	SiO ₂	MgO	MnO	Al ₂ O ₃	FeO
40–60	5–11	5–15	1–4	2–4	15–45

Используя статистический анализ, провели оценку дефосфорирующих свойств шлака в зависимости от его химического состава. Для этого разбили состав шлака на группы: оксиды CaO, SiO₂, MgO, изменяющиеся с шагом 2 %; оксиды MnO, Al₂O₃ без изменения, т. к. в процентном содержании незначительно; остальное содержание будет составлять FeO.

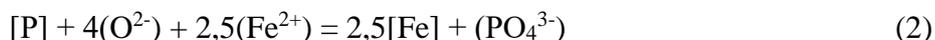
Таблица 4

Химический состав шлака

CaO		MgO		SiO ₂		MnO	Al ₂ O ₃	FeO
№ п/п	%	№ п/п	%	№ п/п	%	%	%	%
1	40–42	1	5–7	1	5–7	1–4	2–4	15–45
2	42–44	2	7–9	2	7–9			
3	44–46	3	9–11	3	9–11			
4	46–48	4	11–13					
5	48–50	5	13–15					
6	50–52							
7	52–54							
8	54–56							
9	56–58							
10	58–60							

Обработав весь массив данных, получили 114 экспериментов и определили средний химический состав шлака и дефосфорирующую способность по полимерной модели, разработанной в УрФУ.

Для выявления основных факторов, влияющих на величину L_p , удобно уравнение суммарной реакции дефосфорации представить как взаимодействие фосфора металла с ионами шлака (по О. А. Есину и В. П. Гельду) [7, 8, 9]:

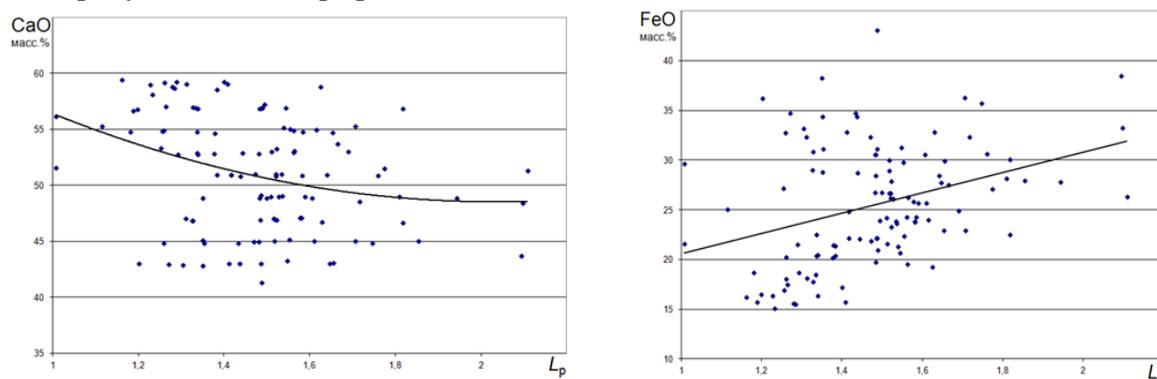


Для коэффициента распределения фосфора в полимерной модели $L_p^{ПМ}$ примем уравнение [8, 9, 10]

$$L_p^{ПМ} = \frac{N_{PO_4^{3-}}}{[P]} = Kp[O]^{2,5} \left(\frac{N_{O^{2-}}}{\bar{K}_\Pi} \right)^{1,5} \quad (3)$$

Полученными данными по расчетам зависимости полимерной модели от состава шлака и сопоставлением с результатами каждого эксперимента подтверждается, что при увеличении значимых оксидов FeO и MnO в шлаках способность дефосфорации металла увеличивается.

Зависимости рафинирующих свойств от оксидов FeO и CaO в шлаке предоставлены на рисунках в виде графиков.



Несмотря на то что CaO является основным оксидом, при увеличении его концентрации более чем на 50 % способность дефосфорации металла снижается, т. к. полного растворения CaO не происходит, что приводит к гетерогензации шлака и снижению рафинирующих свойств.

Наличие повышенной концентрации оксида FeO способствует разжижению извести CaO, тем самым шлак становится гомогенным и повышаются рафинирующие свойства.

Все реакции, связанные с дефосфорацией металла, являются экзотермическими и имеют значительный тепловой эффект. Характерно, что эти реакции, по крайней мере к концу окислительного рафинирования обычно достигают состояния термодинамического равновесия, о чем свидетельствует смещение реакции как в сторону окисления, так и в сторону восстановления фосфора при изменении внешних условий температуры, окисленности ванны и основности шлака. Однако имеющиеся термодинамические данные еще недостаточны для определения расчетом основного параметра процесса дефосфорации коэффициента распределения фосфора между шлаком и металлом и позволяют характеризовать процесс в основном качественно. В связи с этим в расчетах обычно пользуются данными, полученными экспериментально, прежде всего в производственных условиях. При этом за коэффициент распределения обычно принимают

$$L_p = (P_2O_5) / [P] \quad (4)$$

Максимальный коэффициент распределения $L_p^{ПМ}$ получился при системе оксидов, представленной в табл. 5.

Таблица 5

Номера экспериментов, коэффициенты распределения и химический состав шлака

№ эксперимента			Коэффициент распределения по полимерной модели, $L_p^{ПМ}$	Коэффициент распределения L_p	CaO	SiO ₂	MgO	MnO	FeO	Al ₂ O ₃
5	3	2	1,941	101,146	48,889	9,454	8,533	2,051	27,804	3,262
6	2	1	2,093	108,011	51,577	8,438	5,751	1,647	29,654	2,929
6	3	2	2,107	107,978	51,377	9,246	7,844	1,928	26,348	3,249
8	2	1	2,096	113,185	55,285	8,575	5,931	2,036	25,064	3,098

Заключение

Полученные результаты показали хорошую сходимость литературных и экспериментальных данных, что подтверждает адекватность проведенных расчетов. Основная задача дефосфорации (снижение содержания фосфора в металле до минимальных пределов) должна решаться на начальном этапе при выплавке практически любой марки стали кислородно-конвертерным способом получения стали.

Библиографический список

1. Повышение производительности конвертеров путем оптимизации сроков ремонта оборудования / А. А. Лапинский, А. А. Метелкин, О. И. Шевченко // Сталеплавильное производство. Сталь. – ГАОУ ВО «УрФУ» (филиал) НТИ (г. Нижний Тагил, Россия), 2 ООО «ЕВРАЗ» (г. Москва, Россия).
2. Совершенствование и модернизация технологий сталеплавильного производства: (Посвящается 80-летию института) : монография / А. В. Басов [и др.] ; ред. В. А. Кудрин ; Моск. гос. вечерний металлург. ин-т. – Москва : МГВМИ, 2011. – 238 с. : ил. ; 22 см. – Авт. указаны на обороте тит. листа. – Библиогр. в конце глав. – ISBN 978-5-94475-060-0.
3. Технологические процессы производства стали : учебник для вузов / В. А. Кудрин, В. А. Шишимиров. – Москва : МГВМИ, 2011. – 303 с. : ил. ; 21,5 см. – Библиогр.: с. 303. – ISBN 978-5-94475-062-4.
4. Смирнов, Л. А. Металлургическая переработка ванадийсодержащих титаномагнетитов / Л. А. Смирнов, Ю. А. Дерябин, С. В. Шаврин. – Челябинск : Металлургия : Металлургия. Челябинское отделение, 1990. – 254, [1] с. : ил.; 21 см.; ISBN 5-229-00309-X (В пер.) : 1000 экз.
5. Дефосфорация в кислородно-конвертерном производстве стали: стратегии и моделирование // Iron and Steel Technology. – 2015. – № 4. – С. 91–102.
6. Бигеев, А. М. Металлургия стали. Теория и технология плавки стали : учебник для вузов / А. М. Бигеев, В. А. Бигеев. – 3-е изд., перераб. и доп. – Магнитогорск : МГТУ, 2000. – 544 с.
7. Новиков, В. К. Полимерная природа расплавленных шлаков : учебное пособие / В. К. Новиков, В. Н. Невидимов. – Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2006. – 62 с.
8. Новиков, В. К. Прогнозирование рафинирующих свойств многокомпонентных шлаковых расплавов / В. К. Новиков, В. Н. Невидимов // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1997. – № 1. – С. 5–10.

9. Новиков, В. К. Способы выражения основности шлаковых расплавов / В. К. Новиков // Строение и свойства металлических и шлаковых расплавов : Научные сообщения VII Всесоюзной конференции. – Челябинск : ЧПИ. – Т. 3. Ч. 1. – С. 4–12.

10. Современная сталь: теория и технология : учебное пособие для вузов / О. Ю. Шешуков, И. В. Некрасов, А. А. Метелкин [и др.] ; науч. ред. М. В. Миронова ; рец.: И. В. Чуманов, В. А. Бигеев. – Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2020. – 399 с. : ил., табл. ; 29 см. – Библиогр.: с. 380–391. – Прил.: с. 392–398. – ISBN 978-5-9544-0104-2.