

дожигания оксида углерода над ванной $\eta = CO_2/(CO+CO_2)$.

Если дожигание отсутствует ($\{CO\}_\infty = \{CO\}_0$), то параметры θ и η равны 0. И наоборот, если струи ГДЗ обеспечивают полное дожигание оксида углерода над ванной ($\{CO\}_\infty = 0$), то θ и η равны 1.

Относительная концентрация оксида углерода при организации дожигания его кислородом определяется в существенной мере газодинамическими свойствами системы струйной ГДЗ и, в частности, коэффициентом массопереноса β_{CO} и температурой. Текущее значение $\{CO\}_\infty$ равно разности $\{CO\}_0$ и $\{CO\}_s$. Полагаем, что оксид углерода, подсосанный в струю, окисляется полностью, тогда изменение концентрации CO в объеме конвертера вне системы ГДЗ можно выразить следующим образом (%/с):

$$-\frac{d\{CO\}_x}{dt} = b_{CO} \times \frac{S_{пов}}{V_K} \times (\{CO\}_0 - \{CO\}_s), \quad (1)$$

где β_{CO} – коэффициент массоотдачи, м/с; $S_{пов}/V_K$ – отношение поверхности контакта струй ГДЗ с атмосферой к объему конвертера, m^{-1} ; τ – время взаимодействия струй ГДЗ с атмосферой, с.

После интегрирования выражения (1) получим, %:

$$\{CO\}_x = \{CO\}_s + \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}} (\{CO\}_0 - \{CO\}_s) \times \exp\left\{-\frac{x}{\tau}\right\} - b_{CO} \times \frac{S_{пов}}{V_K} \times \tau \cdot \frac{\ddot{u}}{\dot{u}}. \quad (2)$$

Таким образом, текущее значение $\{CO\}_\infty$ в конвертере зависит от параметров газодинамической завесы и коэффициента массоотдачи. Компонента $\{CO\}_0$ определяется расчетом или экспериментально и зависит от скорости обезуглероживания конвертерной ванны v_C , а величина $\{CO\}_s$ определяется эмпирическим путем.

Коэффициент β_{CO} находим из соотношения турбулентного числа Шервуда (Sh_T) и эквивалентного числа Рейнольдса (Re_T) для системы струйных потоков ГДЗ. Можно применить следующее обобщенное критериальное уравнение для потока массы в поперечном сечении турбулентной струи:

$$Sh_T = A \times Re_T^n \times Sc_T^m, \quad (3)$$

где $Sc_T = \epsilon_T/D_T$ – число Шмидта; ϵ_T – коэффициент турбулентной вязкости газа, который для основного участка турбулентной осесимметричной струи находится как: $\epsilon_T = 0.031 \cdot \omega_C \cdot d_C$, m^2/c ; d_C – диаметр сопла, м; D_T – коэффициент турбулентной диффузии, m^2/c ; $Re_T = \omega_C \cdot l/v_T$ – число Рейнольдса; ω_C – скорость потока газа, м/с; l – характерный размер, м.

Для условий массопередачи в осесимметричной струе величины показателей степеней равны $n=0.8$ и $m=0.33$. С учетом этого выражение (3) примет вид:

$$Sh_T = A \times Re_T^{0.8} \times Sc_T^{0.33}. \quad (4)$$

Коэффициент A определяется экспериментально.

Турбулентное число Шервуда можно выразить следующим образом:

$$Sh_T = b_{CO} \times l_C / D_T, \quad (5)$$

где l_C – длина оси струи в системе ГДЗ, м.

Приравняв уравнения (4) и (5) и решив относительно A , получим:

$$A = b_{CO} \times \frac{l_C}{D_T \times Re_T^{0.8} \times Sc_T^{0.33}}. \quad (6)$$

Площадь поверхности струйной ГДЗ в первом приближении определяется как площадь боковой поверхности усеченного конуса с высотой H_C :

$$S_{пов} = \frac{P}{2} \times \frac{H_C}{\cos a} \times (D_{max} - d_\phi), \quad (7)$$

где D_{max} – диаметр зоны продувки, м; d_ϕ – диаметр фурмы, м; a – угол наклона образующей конуса к его высоте.

Значение коэффициента A определяли по данным экспериментов, проведенных на установке горячего моделирования с системой струй ГДЗ. Рассчитанный по полученным результатам коэффициент A равен: $A = 0,0435 \pm 0,0037$.

С учетом вышесказанного, уравнение (4), характеризующее условия массообмена при взаимодействии струйной системы ГДЗ со встречным потоком оксида углерода, примет вид:

$$Sh_T = 0.0435 \times Re_T^{0.8} \times Sc_T^{0.33}. \quad (8)$$

Расхождение между экспериментальными и расчетными значениями коэффициента массоотдачи не превышает 10%.

Таким образом, уравнение (8) можно считать приемлемым для условий дожигания оксида углерода кислородными струями ГДЗ.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕСУЛЬФУРАЦИИ СТАЛИ ПРИ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКЕ В АКОС

Харламов Д.А., Конорев А.В., Серкин М.А.

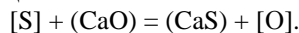
Старооскольский технологический институт

(Ф) МИСиС,

Старый Оскол

Рафинирование металла в ковше основным шлаком служит не только для защиты электрических дуг, но и для уменьшения содержания кислорода и серы, что позволяет проводить более глубокое рафинирование [1,2] металла вне ДСП, в агрегате комплексной обработки стали (АКОС).

При наводке рафинировочного шлака под дуги присаживают от 100 до 200 кг плавикового шпата и около 300 кг извести для плавков [3] арматурного сортамента и около 1000 кг извести для стали ШХ15. Таким образом увеличивают жидкоподвижность и основность шлака; интенсификация перемешивания способствует протеканию металлургических реакций между шлаком и сталью, в первую очередь, десульфурации:



После выпуска из ДСП содержание CaO в шлаке увеличивается, что связано с присадкой извести на АКОС. В результате обработки промышленных данных установлено, что увеличение толщины шлака после присадки извести описывается следующим уравнением:

$$\Delta H_{шл} = 0,0035 \cdot G_{изв}, \quad (1)$$

где $G_{изв}$ – количество введенной извести, кг.

Содержание SiO_2 в шлаке также несколько увеличивается, что связано с переходом кремния в шлак в результате предварительного раскисления стали ферросплавами, содержащими кремний. Поэтому основность шлака $B = \text{CaO}/\text{SiO}_2$ возрастает по мере растворения извести. Количество MgO уменьшается по ходу обработки стали в ковше, что связано с разбавлением шлака выше указанными флюсами. Содержание Al_2O_3 в шлаке также возрастает, в связи с присадками гранулированного алюминия на поверхность шлака, для его раскисления. Кроме того, значительная часть алюминия связывается с кислородом в металле в результате его раскисления. Присадки алюминиевых гранул и коксика на поверхность шлака способствуют снижению содержания железа (окисленности) с 13% до 0,5÷1,0%. Это способствует интенсификации многих металлургических реакций, в том числе десульфурации стали.

Степень десульфурации (η_s) рассчитывали как:

$$\eta_s = \frac{[S]_H - [S]_K}{[S]_H} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где $[S]_H$ и $[S]_K$ - концентрация серы в металле, %, в двух последовательных пробах металла по ходу внепечной обработки, по данным химанализа стали.

Анализ исследований показывает, что увеличение окисленности шлака ($\text{Fe}_{\text{общ}}$, %) приводит к значительному уменьшению величины η_s . Поэтому для сталей, содержащих алюминий, необходимо проводить раскисление шлака гранулами, а для стали ШХ15 (без алюминия) – раскислять шлак коксиком.

Статистическая обработка промышленных данных позволила установить зависимости степени десульфурации различных марок стали от толщины шлака ($H_{\text{шл}}$, мм):

$$h_s = \begin{cases} -2 \cdot 10^{-4} H_{\text{шл}} + 0,135 H_{\text{шл}} + \\ + 14,44 \text{ (для стали ШХ15), } (R^2 = 0,35) \\ 4,4 \ln H_{\text{шл}} + 3,028 \text{ (для стали 45), } (R^2 = 0,29) \end{cases} \quad (3)$$

Анализ уравнений (3) показывает, что для марок с повышенным содержанием углерода степень десульфурации выше примерно на 7÷12%.

Основность шлака ($B = \text{CaO}/\text{SiO}_2$) и начальное содержание серы ($[S]_{\text{нач}}$, %) в стали также оказывают значительное влияние на коэффициент η_s . Чем больше начальное содержание серы, тем легче ее удалить. Одновременное увеличение основности шлака путем

присадки извести также способствует росту степени десульфурации до 30 ÷ 45%.

Т.к. сера является поверхностно-активным веществом, увеличение площади контакта металла с рафинировочным шлаком приводит к увеличению величины η_s , поэтому увеличение расхода аргона ($Q_{\text{ар}}$, м³/ч) на продувку расплава приводит к росту десульфурующей способности шлака.

Таким образом, в результате статистического анализа всех влияющих технологических факторов на процесс десульфурации получили уравнение множественной регрессии зависимости конечной концентрации серы в стали $[S]_K$:

$$[S]_K = 9 \cdot 10^{-3} - 2,2 \cdot 10^{-6} \cdot H_{\text{шл}} - 16 \cdot 10^{-4} \cdot B - 2,4 \cdot 10^{-6} \cdot T + 0,74 \cdot [S]_H - 4,9 \cdot 10^{-5} \cdot \tau_{\text{обр}} - 3,1 \cdot 10^{-5} \cdot Q_{\text{ар}} + 17 \cdot 10^{-5} \cdot \text{Fe}_{\text{общ}}; (R^2 = 0,92), \quad (4)$$

где T – температура металла, °C, $\tau_{\text{обр}}$ – время обработки расплава, мин.

Анализ уравнения (4) показывает, что с ростом толщины шлака и его основности уменьшается конечная концентрация серы в стали. Продолжительность продувки расплава аргоном, увеличение интенсивности продувки и рост температуры стали также приводят уменьшению концентрации серы. При увеличении начальной концентрации серы и окисленности шлака условия десульфурации ухудшаются.

На основе представленных зависимостей разработали номограмму [4] для обеспечения заданной концентрации серы в стали от основных влияющих факторов.

Использование представленной номограммы необходимо для определения необходимой толщины шлака (или его основности), для достижения необходимой величины $[S]_K$, в зависимости от начального содержания серы в стали.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поволоцкий Д.Я. Внепечная обработка стали. М.: Металлургия, 1995, 256 с.
2. Григорян В.А. Физико-химические расчеты электросталеплавильных процессов. М.: Металлургия, 1989. 288 с.
3. Клачков А.А., Красильников В.О., Фомин В.И. и др. // Электromеталлургия, № 4, 1999. с. 30-32.
4. Харламов Д.А., Меркер Э.Э. Труды международной научной конференции «Образование, наука, производство и управление в XXI веке», Ст. Оскол: ООО «ТНТ», 2004. Т2., с. 233-237.