

Динамика раскисления расплава при вакуумной плавке

Киреев А.Д., Капитонов Д.О., Зоркин А.Я., Вавилина Н.А.
Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия

Рассмотрена термодинамическая модель раскисления стали углеродом при вакуумной плавке. Определено влияние концентрации растворенного углерода, кислорода в расплаве, температуры, выдержки и быстроты откачки из вакуумной камеры на степень раскисления расплава.

Ключевые слова: термодинамическая модель, раскисление стали, вакуумная плавка

Раскисление стали – это снижение содержания кислорода в стали до уровня, исключающего возможность окислительных реакций в слитке. Образующиеся при этом твердые, жидкие или газообразные продукты раскисления стали необходимо удалить до затвердевания слитка, так как они снижают качество стали. Содержание кислорода после раскисления снижается на порядок.

Вакуумное раскисление основывается на реакции обезуглероживания, так как в вакууме раскислительная способность углерода значительно возрастает. Известно, что важную роль в вакуумных процессах играет реакция взаимодействия углерода с кислородом, либо с растворенным в металле, либо с находящимся в виде окисных неметаллических включений. Поскольку продуктами раскисления углеродом являются окись и двуокись углерода, почти нерастворимые в металле, то они покидают сферу реакции и выделяются из жидкого металла. Это выгодно отличает раскисление углеродом от использования других раскислителей, продукты взаимодействия которых с кислородом остаются в металле. Одновременно с раскислением металла происходит и его обезуглероживание, что важно для производства низкоуглеродистых сталей и сплавов. При плавке металлов в вакууме выделяется значительное количество газов, которые должны удаляться с помощью вакуумных насосов [1].

Данная работа основана на моделировании в металлургии черных металлов. Моделирование представляет собой метод исследования свойств одного объекта посредством изучения свойств другого объекта, более удобного для исследования и находящегося в определенном соответствии с первым объектом, т.е. при моделировании экспериментируют не с самим объектом, а с его заменителем, который называют моделью [3].

В данной работе рассматриваются термодинамические модели раскисления стали углеродом при вакуумной плавке. Схема раскисления расплава углеродом в вакуумной печи показана на рис. 1.

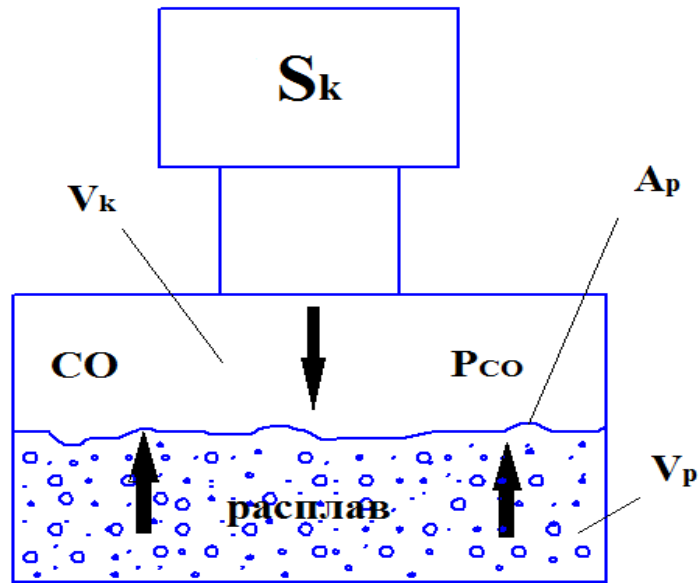


Рисунок 1 - Схема раскисления расплава углеродом в вакуумной печи:

S_k – быстрота откачки; P_{CO} – давление внутри камеры рабочего пространства печи; V_k – объем газовой фазы; V_p – объем расплава; A_p – площадь поверхности расплава

Основной составляющей газовой фазы при раскислении расплава углеродом является газ CO. Процесс раскисления может быть описан с помощью системы дифференциальных уравнений:

$$R * T(t) * \frac{p_{Fe}}{M_C * 100} * \frac{d}{dt} c_C(t) = - \frac{A_p * U(t) * P_A * K_S}{3} * (c_C(t) * c_O(t) * K_{1CO}(t) - P_{2CO}(t)), \quad (1)$$

$$R * T(t) * \frac{p_{Fe}}{M_O * 100} * \frac{d}{dt} * c_O(t) = - \frac{A_p * U(t) * P_A * K_S}{3} * (c_C(t) * c_O(t) * K_{1CO}(t) - P_{2CO}(t)), \quad (2)$$

$$V_k * \frac{d}{dt} * P_{2CO}(t) = \frac{A_p * U(t) * K_S}{3} * (c_C(t) * c_O(t) * K_{1CO}(t) - P_{2CO}(t)) - P_{2CO}(t) * S_k, \quad (3)$$

где, R – газовая постоянная; M_C – молярная масса С (углерода), кг/моль; M_O – молярная масса О (кислорода), кг/моль; A_p – площадь поверхности расплава, м²; $U(t)$ – тепловая скорость молекул в газовой фазе, м/с; $T(t)$ – температура, являющаяся функцией времени; P_A – атмосферное давление, Па; K_S – коэффициент вероятности прилипания молекулы CO к поверхности расплава; c_O , c_C – концентрации растворенного кислорода и углерода в расплаве, % по массе; P_{2CO} – давление CO в газовой фазе, атм; V_k – объем газовой фазы, м³; S_k – быстрота откачки из печи, м³/с; $K_{1CO}(t)$ – константа равновесия реакции $[C] + [O] = CO$; $[C]$, $[O]$ – растворенный углерод и кислород в расплаве.

Константа равновесия реакции $[C] + [O] = CO$ определяется из выражения:

$$K_{CO}(t) = \frac{K_{CO}(t)}{K_r(t,6) * K_r(t,8)}, \quad (4)$$

где, $K_{CO}(t)$, $K_r(t,6)$ $K_r(t,8)$ – константа равновесия образования CO , $[C]$, $[O]$ из простых веществ.

Например, $K_{CO}(t)$ определяется по формуле:

$$K_{CO}(t) = \exp\left(\frac{-\Delta G_{CO}(t)}{R * T(t)}\right), \quad (5)$$

$$\Delta G_{CO}(t) = \Delta H_{CO} - T(t) * \Delta S_{CO}, \quad (6)$$

где, ΔH_{CO} , ΔS_{CO} – стандартные энтальпия и энтропия образования CO из простых веществ. Аналогично определяются $K_r(t,6)$, $K_r(t,8)$. Термодинамические данные (стандартные энтальпии и энтропии) для определения констант равновесия брались из работы [2].

Уравнения (1) и (2) описывают баланс углерода и кислорода в расплаве. Так, изменение количества $[O]$ в расплаве (левая часть уравнения) равно количеству $[O]$, которое удаляется в газовую фазу за счет реакции $[C] + [O] = CO$. Уравнение (3) показывает баланс CO в газовой фазе: изменение количества CO в газовой фазе (левая часть) равно количеству CO , которое поступает в газовую фазу из расплава за вычетом количества CO , которое удаляется из газовой фазы при откачке.

Введем обозначения:

$$A1(t) = R * T(t) * \frac{p_{Fe}}{M_c * 100}, \quad (7)$$

$$A2(t) = \frac{A_p * U(t) * P_A * K_s}{3}, \quad (8)$$

$$A3(t) = R * T(t) * \frac{p_{Fe}}{M_o * 100}, \quad (9)$$

$$B1(t) = \frac{A2(t)}{A1(t)}, \quad (10)$$

$$B2(t) = \frac{A2(t)}{A3(t)}, \quad (11)$$

$$B3(t) = \frac{A_p * U(t) * K_s}{3 * V_k}, \quad (12)$$

$$B4 = \frac{S_k}{V_k}, \quad (13)$$

Тогда правые части системы уравнений (1), (2), (3) запишутся следующим образом:

$$D2(t, x) = \begin{bmatrix} -[(x_0 \times x_1 \times f_c(T, x_0, x_1) \times f_o(T, x_0, x_1) \times K2 - x_2) \times B1] \\ -[(x_0 \times x_1 \times f_c(T, x_0, x_1) \times f_o(T, x_0, x_1) \times K2 - x_2) \times B2] \\ (x_0 \times x_1 \times K2 - x_2) \times f_c(T, x_0, x_1) \times f_o(T, x_0, x_1) \times B3 - x_2 \times B4 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

где, x_0 – концентрация углерода; x_1 – концентрация кислорода; x_2 – давление СО в газовой фазе; f_c , f_o – коэффициенты активностей углерода и кислорода в расплаве.

Коэффициенты активности растворенного кислорода и углерода в расплаве определяются по формулам [3]:

$$f_c(T, c_C, c_O) = 10^{lgf_c(T, c_C, c_O)}, \quad (15)$$

$$f_o(T, c_C, c_O) = 10^{lgf_o(T, c_C, c_O)}, \quad (16)$$

$$\text{где } lgf_c(T, c_C, c_O) = 0,14c_C - 0,34c_O - 0,024c_{Cr} + 0,012c_{Ni} * a_f(T), \quad (17)$$

$$lgf_o(T, c_C, c_O) = -0,45c_C - 0,2c_O - 0,04c_{Cr} + 0,06c_{Ni} * a_f(T), \quad (18)$$

$$a_f(T) = \frac{2557}{T} - 0,365, \quad (19)$$

Система уравнений (1), (2), (3) решалась в программе Mathcad с помощью оператора $F_3 = \text{rkfixed}(x, t_k, N, D_2)$,

где x – вектор неизвестных, t_k – начальное и конечное время расчета,

N – число шагов по времени; D_2 – матрица правых частей системы дифференциальных уравнений.

На рис. 2 показана зависимость концентрации кислорода, углерода в расплаве и давления СО в газовой фазе от времени. Начальная концентрация кислорода равна 0,1 % масс., а углерода – 0,5 % масс. Масса расплава 7500 кг, температура изменялась с 1800 К, до 2000 К в течение 12 мин при дальнейшей выдержки при конечной температуре 2000 К в течении заданного времени. Мощность нагрева при дуговой плавке составляла 3 МВт.

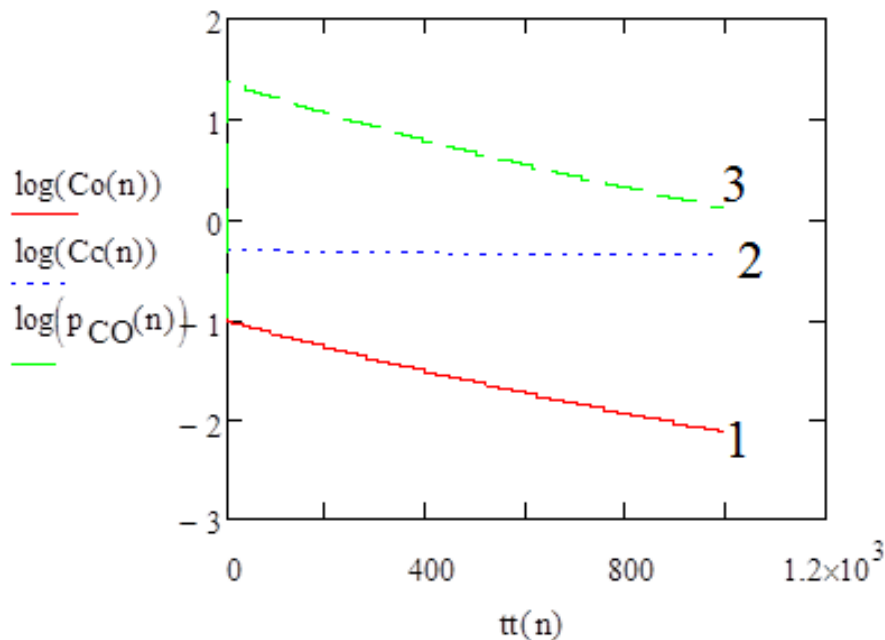


Рисунок 2 - Зависимость концентрации кислорода и углерода в расплаве (% по массе), и давления СО в газовой фазе (атм) от времени (с): 1 – c_o ; 2 – c_c ; 3 – P_{CO} . Начальные условия $C_o = 0,1$ % масс.; $C_c = 0,5$ % масс.

На рис. 3 показаны зависимости концентрации кислорода и углерода и давления СО в газовой фазе от времени. Начальная концентрация кислорода равна 0,1 % масс, а углерода – 0,2 % масс.

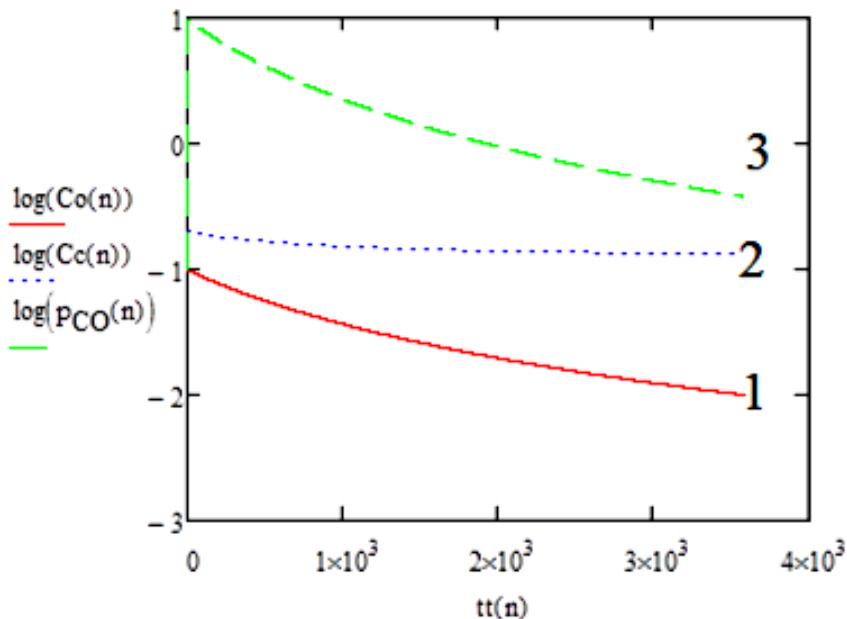


Рисунок 3 - Зависимость концентрации кислорода и углерода (% по массе) в расплаве, и давления СО в газовой фазе (атм) от времени (с): 1 – c_o ; 2 – c_c ; 3 – P_{CO} . Начальные условия $C_o = 0,1$ % масс.; $C_c = 0,2$ % масс.

Анализ расчетных данных показывает, что степень раскисления (% масс. кислорода) сильно зависит от начальной концентрации кислорода, углерода в расплаве, а также от температуры выдержки и быстроты откачки из вакуумной печи. При увеличении концентрации углерода в расплаве с 0,2 до 0,5 % масс., степень раскисления улучшается на порядок. При увеличении температуры выдержки с 1900 до 2000 К время раскисления уменьшается в 3 раза. При увеличении быстроты откачки с 0,01 до 0,1 м³/с степень раскисления улучшается в 2 раза при времени выдержки 1 час. Давление угарного газа (СО) в начале нагрева повышается за несколько минут до 10 атм, затем в течение часа снижается до 1 атм.

Список литературы

1. Быкова П.О. Моделирование объектов и процессов в металлургии: учеб. пособие / П.О. Быкова. Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2010. 132 с.
2. Физико-химические расчеты электросталеплавильных процессов: Сб. задач с решениями / В.А. Григорян, А.Я. Стомахин, И.Ю. Уточкин и др. 2-е изд., перераб. и доп. М.: МИСиС, 2007. 318 с.
3. Цаплин А.И. Моделирование теплофизических процессов и объектов в металлургии: учеб. пособие / А.И. Цаплин, И.Л. Никулин. Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2011. 299 с.