

ТЕПЛОМАССООБМЕН И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ РЕЖИМЫ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛА ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКОЙ

Сапронова Ю.М. (ИТТ-11м) *

Донецкий национальный технический университет

Одним из наиболее эффективных способов раскисления жидкой стали является её внепечная обработка порошковой алюмокальциевой проволокой.

Как показывает обзор современного состояния вопроса, эффективность этого способа значительно превосходит SCAT-процесс и вдувание силикокальциевого порошка в потоке аргона через фурму. Этот способ имеет преимущество даже в сравнении с обработкой стали порошковой силикокальциевой проволокой и характеризуется степенью усвоения кальция из наполнителя ПП (порошковой проволоки) на уровне 29%.

Механизм раскисления, согласно современным представлениям, состоит из следующей последовательности стадий: растворение в жидкой ванне наполнителя ПП, образование и рост оксидных включений. Их удаление из расплава стали продувкой аргоном, которая, перемешивая жидкую ванну, способствует коагуляции оксидных включений и их выносу в шлак, который их ассимилирует. При последующем скачивании шлака сталь очищается от кислорода.

Перед растворением наполнителя ПП, стальная её оболочка должна расплавиться.

Математическая постановка тепловой задачи имеет вид:

1. Начальные условия:

$$\text{а) } T_1 \equiv T_3 \equiv T_0, \quad \text{б) } R_1(0)=R_2(0)=R, \quad \text{в) } R_3(0)=R+\sigma, \quad (1)$$

где T_0 – температура окружающей среды, °C; R – начальный радиус границы, отделяющий элемент, который вводится, от стальной оболочки проволоки, м; σ – её толщина при $\tau=0$, м.

Рассмотрим диапазон изменения радиальной координаты r в каждой из областей ($i=1,2,3$).

$$i=1: 0 \leq r \leq R_1(\tau) = R + \Delta R_1(\tau), \quad \Delta R_1 < 0;$$

$$i=2: R_1(\tau) \leq r \leq R_2(\tau) \equiv R;$$

$$i=3: R \leq r \leq R_3(\tau) = R + \Delta R_3(\tau), \quad \Delta R_3(0) = \sigma,$$

где R_1 – граница твердой фазы порошкового элемента, который вводится, м; R_2 – граница его жидкой фазы, м; R_3 – внешняя граница стальной оболочки, м.

Последняя включает как первичную оболочку, так и замороженную на неё твердую стальную корку. Очевидно, что $R_3 > R_2 > R_1$. При этом $\Delta R_1 < 0$, $\Delta R_2 = 0$. Зависимость $\Delta R_3(\tau)$ более сложная:

* Руководитель – к.т.н., доцент кафедры ТТ Захаров Н.И.

$$\Delta R_3(\tau) : \begin{cases} > 0 & \text{при намораживании корки,} \\ < 0 & \text{при плавлении оболочки.} \end{cases}$$

2. Граничные условия:

$$\text{а) ось симметрии (r=0): } \frac{\partial T_1}{\partial r} = 0, \quad (2)$$

$$\text{б) } r=R_1: T_1=T_3 < T_{\text{пл}}^{\text{э}}, \quad (3)$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} + \rho_1 L_1 \dot{R}_1, \quad T_2 = T_{\text{пл}}^{\text{э}}, \quad (4)$$

$$\text{в) } r=R: T_2=T_3, \quad (5)$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r}, \quad (6)$$

$$\text{г) } r=R_3: T_3=T_M < T_{\text{пл}}^{\text{м}}, \quad (7)$$

$$-\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} + \rho_3 L_3 \dot{R}_3 = \alpha (\dot{O}_{i,0} - \dot{O}_i), \quad \dot{O}_3 = \dot{O}_{i\text{е}}^i,$$

где $T_{\text{пл}}^{\text{э}}$, $T_{\text{пл}}^{\text{м}}$ – температуры плавления порошкового элемента и стали, °C; T_M , $T_{M,0}$ – температура жидкой стали при $r=R_3$ в ковше и его объеме, °C; ρ_1 , ρ_3 – плотности элемента, который вводится, и стали соответственно, кг/м³; L_1 , L_3 – их удельные теплоты фазовых переходов, Дж/кг; \dot{R}_1 , \dot{R}_3 – скорости перемещения границ $r=R_1$ и $r=R_3$, м³/с.

При компьютерном моделировании тепломассообмена ПП с жидкой ванной была выявлена монотонно убывающая зависимость скорости ввода ПП в расплав стали $U_{\text{опт}}$, при которой эффект её раскисления максимален, от диаметра ПП. Это позволило обобщить эмпирическую формулу:

$$U_{\text{опт}} = k \cdot H \cdot e^{\gamma \cdot \Theta \cdot (\delta/d)}, \quad (8)$$

где k – размерный коэффициент, характеризующий разброс экспериментальных данных, 1/с; H – глубина жидкой ванны, м; γ – коэффициент настройки полуэмпирической формулы (8) на реальную технологию; Θ – температура стали; δ , d – толщина оболочки и диаметр ПП, м;

$$\Theta = (T - T_{\text{п}}) / T_{\text{п}} \quad (9),$$

где T , $T_{\text{п}}$ температура стали в ковше и ликвидуса соответственно, °C.

Известно, что концепция использования математических моделей смешанного типа (в частности, полуэмпирических формул типа (8)) для разработки ресурсосберегающих режимов современных металлургических технологий наиболее перспективна. Снижение k до уровня $U_{\text{опт}}$ экономит материал ПП.