

# О ГЛУБИНЕ ПРОПИТКИ РАСПЛАВОМ ЗАСЫПКИ ИЗ МЕТАЛЛИЗОВАННЫХ ОКАТЫШЕЙ ПРИ ФОРМОВАНИИ РАСХОДУЕМЫХ ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПЕРЕПЛАВА

**В.И. Чуманов, В.И. Потапов, И.В. Чуманов, ЕЛ. Ворона**

Одним из путей снижения себестоимости металла электрошлакового переплава (ЭШП) является формирование расходуемых электродов из металлизированных окатышей (МО) без их первичного переплава. В работе [1] рассмотрена технология получения расходуемых электродов (РЭ) из МО. При этом есть несколько вариантов получения РЭ - готовить смесь из МО и расплава или засыпку из МО пропитать расплавом. В том и другом способе есть свои плюсы и минусы. Если при первом способе из дозаторов непрерывно подается МО и расплав и происходит естественное перемешивание смеси, то может оказаться неравномерность распределения МО по объёму РЭ, что крайне нежелательно. При втором способе дозаторы периодически подают МО и расплав, т.е. образуется сначала засыпка из МО, которая затем пропитывается расплавом. При этом способе необходимо соблюдать достаточно жесткие требования к температурным режимам. На какую глубину в засыпке проникнет расплав и «склеит» МО, тем самым определится толщина слоя засыпки, которую нужно обеспечить. После кристаллизации этого слоя, цикл формирования повторяется, тем самым «наращивается» РЭ нужной длины.

Для компьютерного моделирования рассмотрим математическое описание теплофизических процессов при движении расплава по засыпке из МО (рис. 1). Под давлением веса, расплав фильтруется по засыпке, при этом происходит теплообмен между расплавом и засыпкой. Изменяются вязкость теплоносителя, скорость фильтрации, коэффициент теплоотдачи, проницаемость скелета засыпки. Теплофизические процессы в системе окатыш-расплав рассмотрены в работе [1], где проанализировано тепловое взаимодействие между окатышем и расплавом. В данной работе рассмотрено моделирование конвективного теплообмена в такой системе. В работе [2] рассмотрена подобная задача, но у теплоносителя отсутствовал фазовый переход. В данной задаче это условие является основополагающим. Ибо это определяет технологический параметр - глубину проникновения расплава в засыпку до затвердевания. Зная, на какой глубине в засыпке закристаллизуется расплав, можно рассчитать объемные скорости подачи МО и расплава.

При разработке математической модели исходим из следующих предпосылок:

1. Засыпку из МО примем как капиллярно-пористое тело, скелет которого состоит из МО с регулярной пористостью.
2. Диффузией расплава в микропоры МО можно пренебречь, т.е. корка твердого расплава образуется практически мгновенно.
3. Теплофизические параметры скелета засыпки остаются величинами постоянными.
4. Течение расплава в засыпке происходит в режиме идеального вытеснения.
5. Теплообмен с окружающей средой отсутствует.
6. При достижении температуры ликвидуса на фронте движения расплава, скорость фильтрации становится равной нулю и процесс расчета заканчивается.

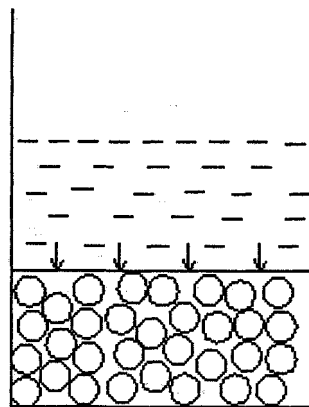


Рис. 1. Расчетная модель

Итак, с учетом принятых допущений рассмотрим в качестве исходных уравнений соотношения, связывающие между собой основные термодинамические параметры процесса:

1. Уравнение движения для одномерного потока расплава

$$\omega(x, t) = -K_f(T_1) \mu(T_1) \frac{dP}{dx}. \quad (1)$$

2. Уравнения энергии для расплава и засыпки имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_1}{\partial \tau} + v \frac{\partial T_1}{\partial x} &= \alpha_1(T_2 - T_1) + a_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}; \\ \frac{\partial T_2}{\partial \tau} &= \alpha_2(T_1 - T_2) + a_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $v = \frac{\omega}{\Pi}$ ;  $\alpha_1 = \frac{\alpha}{c_1 \rho_1 \Pi}$ ;  $\alpha_2 = \frac{\alpha}{c_2 \rho_2 (1 - \Pi)}$ ;

$$a_1 = \frac{\lambda_1}{c_1 \rho_1}; a_2 = \frac{\lambda_2}{c_2 \rho_2}.$$

3. Уравнения теплоемкости, теплопроводности, плотности расплава приняты в виде [1]:

$$c_1 = 487,955 + 0,192 T_1 - 103 [C] + 130 [C]^2;$$

$$\lambda_1 = 45,79 - 0,055 T_1 + 2,4 \cdot 10^{-5} T_1^2 - 6,323 [C] + 75,586 [Mn] - 83 [Mn]^2;$$

$$\rho_1 = 6980 + 0,0008(1600 - T_1) - 0,128 [C] - 0,069 [Si] - 0,0035 [Mn].$$

4. Теплота фазового перехода при кристаллизации расплава рассчитывалась по формуле

$$L = 253,38 - 58,06 [C] + 136,93 [Mn] - 3,78 [C][Mn] - 125,77 [Mn]^2.$$

5. Температуры ликвидуса, солидуса расплава рассчитывались по уравнениям:

$$T_l = 1537 - 88 [C] - 8 [Si] - 5 [Mn] - 4 [Ni] - 5 [Cu] - 2 [Mg] - 2 [V] - 1,5 [Cr] - 25 [S] - 30 [P];$$

$$T_s = 1537 - 5,5 [C] - 12,3 [Si] - 6,8 [Mn] - 124,5 [P] - 183,9 [S] - 4,3 [Ni] - 1,4 [Cr] - 4,1 [Al].$$

6. Интерполяционное уравнение зависимости вязкости расплава от температуры

$$\mu(T_1) = \nu \rho_1.$$

7. Уравнение связи коэффициента теплоотдачи потока к МО [3]

$$\alpha = f_1(v, Re, Pr, Nu).$$

Уравнения (1), (2) дополнены соответствующими начальными и граничными условиями.

В уравнениях (1)-(7) приняты следующие обозначения: индексы - 1 - для расплава, 2 - для засыпки;  $T$  - температура, °C;  $\tau, x$  - координаты по времени, с; длине, м;  $v$  - скорость фильтрации

расплава, м/с;  $a$  - температуропроводность, м<sup>2</sup>/с;  $c, \rho, \lambda$  - соответственно теплоемкость, Дж/(кг\*°C); плотность сред, кг/м<sup>3</sup>; теплопроводность сред, Вт/(м\*°C);  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>\*°C);  $\Pi$  - пористость засыпки;  $\mu, \nu$  - динамическая, н\*с/м<sup>2</sup>, кинематическая, м<sup>2</sup>/с вязкости расплава;  $P$  - давление столба расплава;  $K_f$  - коэффициент проницаемости засыпки.

Для компьютерной реализации теплофизических процессов при движении расплава по засыпке использована разностная сетка в области  $D$ . В качестве сетки области  $D$  рассмотрена совокупность точек пересечения прямых  $\tau = n h, x = u \Delta x$ , где  $u = 1, 2, \dots, m$ . Для численной реализации уравнений (1), (2) с начальными и граничными условиями использованы разностные аналоги производных.

После дискретизации задачи и элементарных преобразований система уравнений представлена в виде

$$T_u^{n+1} = B \cdot T_u^n,$$

где  $B$  - ленточная блочная матрица, определяющая теплофизические свойства системы расплав-засыпка и параметры сетки;  $T_u^n$  и  $T_u^{n+1}$  - блочные матрицы, определяющие распределения температур на слое  $u$ , на  $n$  и  $n+1$ -м временном промежутке.

При  $n = 0$  значение номера  $k$  соответствует границе входа расплава в засыпку. В начальный момент времени вычисляются элементы матрицы  $B$ , определяющие теплообмен между расплавом и скелетом засыпки. Затем по известному начальному распределению температур слоев вычисляются распределение температур на  $(n+1)$ -м временном слое. Как показали результаты вычислительного эксперимента, итерационный процесс устойчивый при  $\Delta \tau < h/v$ .

В расчетах температура жидкого расплава была равна 1600 °C, а высота слоя расплава поддерживалась 150 мм. Крайние точки на соответствующих кривых соответствуют началу протекания процессов кристаллизации жидкого расплава.

Из полученных результатов (рис. 2), видно,

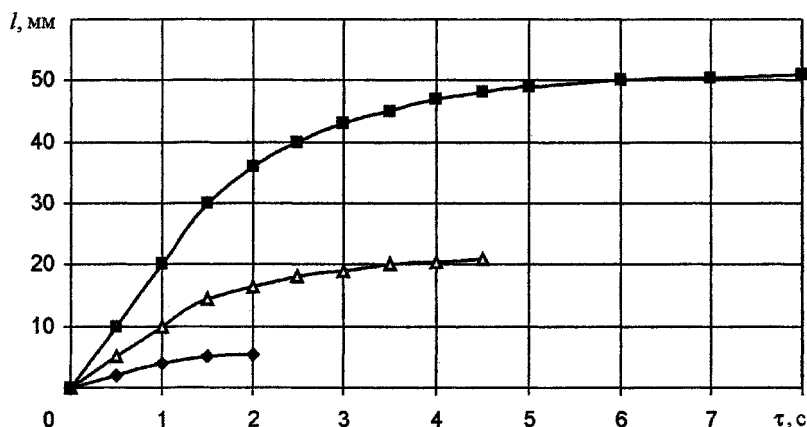


Рис. 2. Зависимость глубины пропитки засыпки из МО расплавом от времени и начальной температуры МО:  $\diamond-\diamond-\diamond$  - температура предварительного подогрева металлизированных окатышей составляла 20 °C;  $\Delta-\Delta-\Delta$  - 200 °C;  $\square-\square-\square$  - 500 °C

---

что с увеличением температуры предварительного подогрева металлизированных окатышей глубина проникновения жидкого расплава увеличивается (увеличивается толщина пропитанного слоя). Однако с повышением температуры предварительного подогрева металлизированных окатышей начинают более интенсивно протекать процессы их вторичного окисления, а также снижается привлекательность данной технологии с точки зрения технико-экономических показателей.

Таким образом, по расчетной скорости фильтрации, времени и температуре расплава и МО вычисляется глубина пропитки, что позволяет определить массовую скорость подачи МО и расплава.

### **Литература**

1. *Теплофизические процессы, протекающие при формировании расходоуемых электродов из металлизированных окатышей* / В.И. Чуманов, В.И. Потапов, КВ. Чуманов, В.В. Вотинов // Изв. вуз. *Черная металлургия*. - 2005. - МП. - С14-17.
2. *Потапов В.И. Теплообмен при фильтрации жидкости в капиллярнопористом теле с переменными параметрами системы* // ИФЖ. - 1977. — Т.33.-М2.-С. 298-303.
3. *Длительность процесса усвоения конверторной ванны металлизированных окатышей* / В.И. Баптизманский, В.И. Душа, Б.М. Бойченко и др. //Изв. вуз. *Черная металлургия*. - 1986. -№10. -С. 33-35.