

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕТАЛЛИЗОВАННЫХ ОКАТЫШЕЙ И ЖИДКОЙ ЛИГАТУРЫ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ЦЕЛЬНОЛИТОЙ ЗАГОТОВКИ ДЛЯ ЭШП

Е.А. Ворона, В.И. Потапов, А.Н. Суров, И.В. Чуманов

THERMO-PHYSICAL CALCULATION OF THE INTERACTION OF IRON-RICH PELLETS AND LIQUID LIGATURE WHEN PRODUCING THE UNIT CAST BLANK FOR ESR PROCESS

E.A. Vorona, V.I. Potapov, A.N. Surov, I.V. Chumanov

Снижения себестоимости электрошлакового металла можно добиться за счет получения литых расходуемых электродов с использованием металлизированных окатышей и лигатуры. Экономически выгодным является получение цельнолитой заготовки для ЭШП методом литья в специальные изложницы.

В данной работе проведен расчет теплофизических процессов, протекающих при взаимодействии металлизированных окатышей и жидкой лигатуры, с учетом фактора масштабности.

Ключевые слова: металлизированные окатыши, лигатура, расплав, электрод, теплообмен, температура.

The electrofluxed metal cost reduction can be achieved by means of getting cast consumable electrode using iron-rich pellets and ligature. Producing of the unit cast blank for ESR by method of casting into special molds is economical.

In this work the authors provide calculation of the thermophysical processes taking place during the interaction of the iron-rich pellets and liquid ligature. The size factor is taken into account.

Keywords: iron-rich pellets, ligature, liquid melt, electrode, heat exchange, temperature.

Одним из способов снижения себестоимости электрошлакового металла является формирование расходуемого электрода из смеси металлизированных окатышей (МО) и жидкой лигатуры [1]. Полученная смесь лигатура - МО подается в специальную изложницу, где происходит ее кристаллизация и получение цельнолитой заготовки для электрошлакового переплава (ЭШП).

При осуществлении данного способа формирования заготовки возникает ряд технологических проблем. Прежде всего, необходимо определить соотношение расплав - металлизированные окатыши. С одной стороны, чем больше в составе смеси МО, тем меньше себестоимость электрода, с другой стороны, окатыши как охладитель снизят температуру смеси и монолитного формирования заготовки не произойдет. Также возникает вопрос, с какой начальной температурой подавать составляющие смеси расплав - МО. Ответ на эти вопросы можно получить с помощью математической модели, описывающей теплообмен между компонентами смеси.

В работе [2] рассмотрены теплофизические процессы в элементарной ячейке «расплав - металлизированный окатыш», где получены значимые характеристики по динамике изменения радиуса

окатыша, коэффициента теплообмена между расплавом и окатышем.

В данной работе рассматривается теплообмен между составляющими смеси расплав - МО. При постановке задачи были приняты следующие, достаточно общие, допущения:

1. Теплообмен с окружающей средой отсутствует.

2. Теплопередача между составляющими смеси осуществляется по закону Фурье и значительно превосходит теплопередачу теплопроводностью ввиду малого времени «существования» смеси.

3. Компоненты смеси полностью перемешиваются между собой, т.е. принята модель идеального смешивания.

4. При достижении температуры ликвидуса расплава полагаем, что смесь закристаллизовалась.

С учетом принятых допущений уравнения, описывающие теплообмен между компонентами смеси, имеют вид [3]

$$\frac{d\theta}{d\tau} = A\theta, \quad (1)$$

где $\theta^T(\tau) = (\theta_1(\tau)\theta_2(\tau))$ - вектор-функция температур компонентов смеси;

$$A = \begin{pmatrix} -H_1 & H_1 \\ H_2 & -H_2 \end{pmatrix} - \text{матрица параметров физических свойств компонентов смеси.}$$

Начальные условия: $\theta^T(0) = (\theta_{10}, \theta_{20})$.

В уравнении (1) приняты обозначения θ_i – температуры компонентов i -й смеси; τ – время, с; $H_i = \alpha F / (\rho_i c_i V_i)$; α – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·°C); F – поверхность раздела смесеобразующих компонентов, м²; ρ_i, c_i, V_i – соответственно плотность, кг/м³; удельная теплоемкость, Дж/(кг·°C); объем м³ i -й компоненты смеси; $i = 1$ для расплава, $i = 2$ для МО.

После преобразования по Лапласу системы (1) и решения ее получим

$$\begin{aligned} T_1(s) &= (s\theta_{10} + \theta_{10}H_2 + \theta_{20}H_1) / s(s + H_1 + H_2); \\ T_2(s) &= (s\theta_{20} + \theta_{10}H_2 + \theta_{20}H_1) / s(s + H_1 + H_2), \end{aligned} \quad (2)$$

где $T_i(s)$ – изображения по Лапласу функций $\theta_i(\tau), (i = 1, 2)$; s – комплексный параметр оператора Лапласа. После обратного перехода от изображения к оригиналу, получим решение системы (1) в виде

$$\begin{aligned} \theta_1(\tau) &= \theta_{10}p_2 + [\theta_{20} + e^{-b\tau}(\theta_{10} - \theta_{20})]p_1; \\ \theta_2(\tau) &= \theta_{20}p_1 + [\theta_{10} - e^{-b\tau}(\theta_{10} - \theta_{20})]p_2, \end{aligned} \quad (3)$$

где $b = H_1 + H_2$; $p_1 = H_1 / b$; $p_2 = H_2 / b$.

Для расчета параметров системы (1) была проведена серия экспериментов. Так, для определения поверхности раздела сред F вычислялось число МО – n в объеме V_2 по экспериментально определенной ε пористости засыпки. Величина $\varepsilon(d_{\text{МО}})$ равна:

$$\varepsilon = (V_2 - \pi d_{\text{МО}}^3 n / 6) / V_2 \quad (4)$$

и представляет собой долю пространства засыпки объема V_2 , незаполненную МО, причем $0 < \varepsilon < 1$. Как известно, средний диаметр металлизированных окатышей составляет от 5 до 25 мм. Поэтому эксперименты проводились для МО с диаметрами в этом интервале. Засыпка МО осуществлялась произвольно без уплотнения, вибрации, т.е. так, как формируется в производственных условиях. Окатыши перед засыпкой замачивались в воде, так как они пористые и часть воды поглощают. Засыпка из МО объема V_2 заливалась водой до определенного уровня. Затем вода выливалась, и измерялся ее объем. Все экспериментальные данные статистически обрабатывались со всеми оценками погрешностей. В результате была получена зависимость пористости засыпки МО от диаметра окатышей в виде

$$\varepsilon(d_{\text{МО}}) = -1,347 \cdot 10^{-3} d_{\text{МО}}^2 + 0,055 d_{\text{МО}} + 0,018, \quad (5)$$

где $d_{\text{МО}}$ – диаметр металлизированных окатышей, мм.

Коэффициент погрешности при вычислении $\varepsilon(d_{\text{МО}})$ не превышает 0,037. Как видно из уравнения (5), величина пористости засыпки нелинейно зависит от диаметра окатышей: $\max \varepsilon(20, 41) = 0,579$.

По известной пористости засыпки и данного диаметра МО определяется их число n по формуле (4) в объеме V_2 :

$$n = ((V_2 - V_2 \varepsilon) 6) / \pi d_{\text{МО}}^3. \quad (6)$$

Суммарная площадь теплообмена между расплавом и металлизированными окатышами равна:

$$F = n \pi d_{\text{МО}}^2. \quad (7)$$

При этом реальная площадь теплообмена будет несколько меньше, так как окатыши будут иметь точки касания друг с другом, но это будет зависеть от соотношения объемов V_1 и V_2 . Чем больше V_1 точек касания между МО будет меньше, и погрешность в определении F соответственно меньше. Для расчета температурных характеристик компонентов смеси был составлен алгоритм и разработана программа расчета на компьютере.

Массив исходных данных для одного из вариантов расчетов представлен в таблице.

Исходные данные для расчета

Параметр	Размерность	Расплав, $i = 1$	МО, $i = 2$
θ	°C	$\theta_{10} = 1600$	$\theta_{20} = 200$
α	Вт/(м·°C)	35 000	35 000
ρ	кг/м ³	7790	2600
c	Дж/(кг·°C)	840	487,9
V	м ³	0,25	0,1
$d_{\text{МО}}$	м	–	0,02
ε	–	–	0,5792

Зависимости температуры компонентов смеси «расплав - МО» по времени представлены на рис. 1.

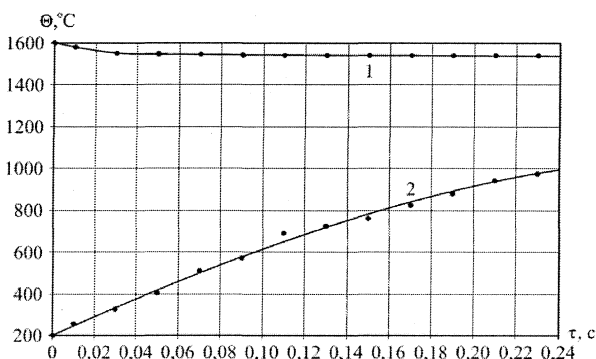


Рис. 1. Изменение температуры компонентов с течением времени: 1 – расплав, 2 – металлизированные окатыши

Зависимость времени «схватывания» смеси τ_k от соотношения объемов компонентов смеси (расплав / МО) V_2 / V_1 представлена на рис. 2.

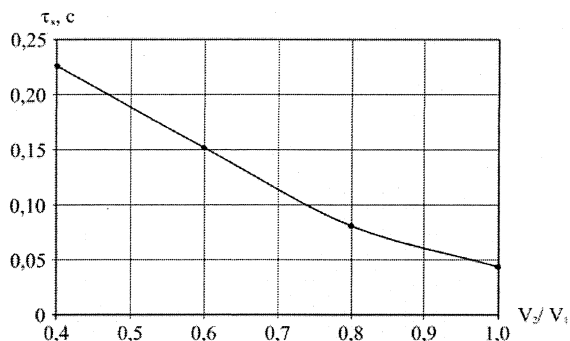


Рис. 2. Изменение времени кристаллизации смеси τ_k в зависимости от V_2 / V_1

При изменении начальной температуры окатышей θ_{20} время кристаллизации смеси τ_k представлено на рис. 3.

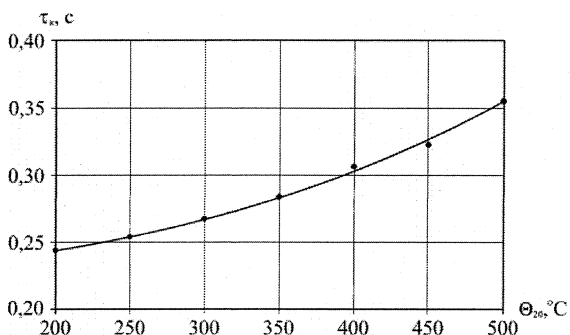


Рис. 3. Изменение времени кристаллизации смеси τ_k в зависимости от начальной температуры окатышей θ_{20}

Выводы

Получены зависимости температуры жидкой лигатуры, начальной температуры подогрева металлизированных окатышей и их соотношений объемов в смеси от времени. По формуле (3) можно рассчитывать время кристаллизации смеси, что позволит определить время транспортировки смеси к изложнице для формирования цельнолитой заготовки в условиях промышленного производства.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках проекта № 2.1.2/207 «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2010 гг.)»

Литература

1. Пат. 2297462 Российская федерация, МПК⁷ С22В 9/18. Способ получения расходуемых электродов / В. И. Чуманов, В.И. Потапов, И.В. Чуманов, В.В. Вотинов. - № 2005131403; заявл. 10.10.2005; опубл. 20.04.2007, Бюл. № 11.
2. Теплофизические процессы, протекающие при формировании расходуемых электродов из металлизированных окатышей / В.И. Чуманов, В.К. Потапов, И.В. Чуманов, В.В. Вотинов // Известия вузов. Черная металлургия. - 2005. - № 11. - С. 14-17.
3. Потапов, В.И. Математические модели теплофизических процессов в объектах многослойной структуры: моногр. / В.И. Потапов. - Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. - 270 с.

Поступила в редакцию 31 августа 2009 г.