

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ШЛАКА ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО ПЕРИОДА ПЛАВКИ В ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

Разживин А. В.

Исследованы управляющие параметры температурного режима восстановительного периода плавки металла в дуговых сталеплавильных печах и технологических комплексах «Печь-Ковш». Проведено математическое описание и аналитическое решение дифференциального уравнения краевой задачи нестационарного теплообмена на основе интегрально-дифференциальных уравнений теплопроводности. Полученное аналитическое решение позволяет исследовать изменение температуры шлака в зависимости от величины мощности на электрической дуге, массы и теплопроводности шлака в печи. В результате теоретического исследования процесса теплообмена в замкнутом пространстве печи построены поверхности изменения температуры шлака по длине ковша при дуговом подогреве.

Досліджені керуючі параметри температурного режиму відновлювального періоду плавки металу в дугових сталеплавильних печах та технологічних комплексах «Піч-Ківш». Проведено математичне описання і аналітичне рішення диференційного рівняння крайової задачі нестационарного теплообміну на основі інтегрально-диференційних рівнянь теплопровідності. Отримане аналітичне рішення дозволило дослідити зміну температури шлаку в залежності від величини потужності на електричній дузі, маси і теплопровідності шлаку в печі. В результаті теоретичних досліджень процесу теплообміну в замкнутому просторі печі побудовані поверхні зміни температури шлаку по довжині ковша при дуговому підігріві.

Operating parameters of a temperature mode of the regenerative period of fusion of metal in arc steel-smelting furnaces and technological complexes "Furnace-ladle" are investigated. Is spent the mathematical description and the analytical decision of the differential equations of a regional problem of non-stationary heat exchange on the basis of the integralno-differential equations of heat conductivity. The received analytical decision allows to investigate temperature change of temperature of slag depending on capacity size on an electric arch, weights and heat conductivity of slag in the furnace. As a result of theoretical research of process of heat exchange in the closed space of the furnace surfaces of change of temperature of slag on length of a ladle are constructed at arc heating.

Разживин А. В.

канд. техн. наук, доцент кафедры АПП ДГМА
app@dgma.donetsk.ua

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

УДК 681.5:51-74

Разживин А. В.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ШЛАКА ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО ПЕРИОДА ПЛАВКИ В ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

В настоящее время возросли требования к качеству металла. В современных условиях производства стали мартеновские печи, конверторы не обеспечивают необходимого качества. В связи с этим получает распространение более прогрессивная технология внепечной обработки стали в комплексах «Печь-Ковш» как разновидности дуговой сталеплавильной печи.

Дуговая сталеплавильная печь (ДСП) – сложный агрегат, в котором взаимодействуют электрические, энергетические (тепловые) и металлургические процессы. В ДСП в качестве источника нагрева и плавления металла используется выделение тепла при горении электрической дуги между электродом и ванной жидкого металла.

В процессах дуговой плавки металлов качество конечного продукта определяется химическим составом и температурным режимом восстановительного периода. Химический состав зависит от исходной шихты и добавок по ходу плавки и практически не зависит от электрического режима. В то же время отклонения от заданного температурного режима, особенно в сторону перегрева, могут вызвать повышенное содержание газов, неметаллических включений и нежелательные отклонения по химическому составу [1–3].

Проведение восстановительного периода плавки в технологических комплексах «Печь-Ковш» с дуговым подогревом обеспечивает высокую степень расплава, позволяет внедрить полную механизацию и комплексную автоматизацию процесса, сокращает цикл металлургического производства. Тепловой режим восстановительного периода плавки является одним из основных параметров технологического процесса, т. к. в данный период закладываются основные физико-химические свойства металла. Стабилизация теплового режима на уровне ± 10 °С является обязательным условием получения качественной продукции. Следовательно, необходима система управления температурным режимом плавки, которая будет поддерживать установленный директивный температурный график.

В связи со сложностью измерений показателей теплового состояния шлака и расплава возникает необходимость в разработке математических моделей, которые достаточно полно описывают тепловые процессы при электродуговой плавке металла. Такие математические модели основываются на нелинейных дифференциальных уравнениях в частных производных, содержат граничные условия различного рода, а также условия для определения положения границы фазового перехода.

Целью работы является разработка математической модели тепловых параметров шлака восстановительного периода плавки технологического комплекса «Печь-Ковш», которая учитывает изменяющиеся в процессе плавки подводимую от электрической дуги мощность и технологические параметры процесса.

Рассматривая технологический процесс электротермической обработки металла в восстановительный период плавки и конструктивные особенности дуговых сталеплавильных печей (ДСП) и технологических комплексов «Печь-Ковш», можно представить дуговую печь двумя взаимодействующими между собой подсистемами:

- 1) электрическая дуга, непосредственно преобразующая электрическую энергию в подводимую к металлу теплоту и характеризующаяся мощностью P_0 ;
- 2) печь, в которой происходят процессы преобразования жидкого металла в сталь заданного качества и характеризующаяся мощностью тепловых потерь P_{mn} .

Анализ интегральных показателей энергетических процессов в дуговой сталеплавильной печи, учет их пространственного распределения может быть сделан путем решения дифференциальных уравнений в частных производных. Такое решение позволяет описать тепловые процессы, распределенные во времени и пространстве [1, 2].

Используя уравнения теплового баланса и пренебрегая тепловым потоком, выделяемым в расплаве (жидком металле) за счет химических реакций, можно записать:

$$c_m \cdot M_m \cdot \frac{\partial T_m}{\partial \tau} = c_{ш} \cdot M_{ш} \cdot \frac{\partial T_{ш}}{\partial \tau} + \lambda_3 \frac{P_{\partial}(\tau) - P_{mn}(\tau)}{\pi r_3^2}, \quad (1)$$

где $C_m, C_{ш}$ – удельные теплоемкости жидкого металла и шлака, соответственно;
 $M_m, M_{ш}$ – массы жидкого металла и шлака, соответственно.

В уравнение (1) входит величина тепловых потерь $P_{mn}(\tau)$, которая состоит из сравнительно небольших постоянных потерь через футеровку и охлаждающую воду и значительных потерь переменного характера, связанных с отходящими газами [1, 3]. Большую роль в теплообмене рабочего пространства печи играет шлак, так как по мере нагрева шлак аккумулирует тепло металлу. При этом шлак быстрее реагирует на изменение мощности, чем ванна жидкого металла.

Анализ уравнения (1) показывает, что изменение температуры участвующих в теплообмене тел зависит от величины теплового потока, воздействующего на шлак и расплав в результате дугового подогрева:

$$Q^*(t) = \lambda_3 \frac{P_{\partial}(\tau) - P_{mn}(\tau)}{\pi r_3^2}. \quad (2)$$

При описании тепловых процессов, происходящих в электротермических установках (ДСП и комплексах «Печь – Ковш»), используют краевую задачу нестационарного теплообмена. При математическом описании теплообмена в шлаке принято рассмотрение двухмерного нестационарного распределения температуры в шлаке на основе интегрально-дифференциальных уравнений теплопроводности Фурье [2, 3].

Опишем процесс теплообмена в шлаке дуговой печи дифференциальным уравнением теплопроводности в частных производных:

$$\frac{\partial T_{ш}}{\partial t} = a_1 \left(\frac{\partial^2 T_{ш}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{ш}}{\partial r} \right) + \delta(r - r_1) Q^*, \quad (3)$$

где $\delta(r - r_1)$, $\delta(x)$ – дельта-функции по соответствующим координатам распространения тепла от электрической дуги;

$F(r, t) = \delta(r - r_1) Q^*$ – параметр, характеризующий мощность источника тепла, передаваемого к шлаку;

$a_1 = 1/c_{ш} M_{ш}$ – тепловой передаточный коэффициент шлака, соответственно;

$C_{ш}$ – удельная теплоемкость шлака;

$M_{ш}$ – масса шлака.

В уравнении (3) приняты следующие допущения: о усреднении температуры расплава под действием электромагнитного перемешивания, цилиндрической форме печи и равномерном распределении мощности в фазах короткой сети. Такое предположение позволяет утверждать об усреднении температуры по слоям и равномерном ее распределении по всей длине.

Расчетная схема процесса теплообмена относительно распределения температуры в шлаке и расплаве приведена на рис. 1.

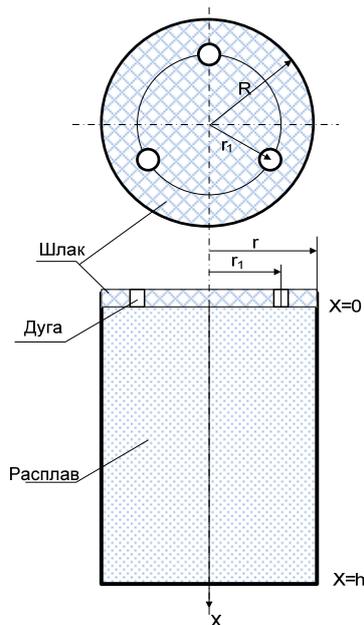


Рис. 1. Расчетная схема процесса теплообмена в шлаке при дуговом подогреве

Уравнение (3) описывает теплопроводность в шлаке при наличии внутреннего источника тепла мощностью Q^* , излучаемой электрической дугой горячей непосредственно в шлаке. Запишем начальные условия для уравнения (3):

$$T_{uu}(r,0) = T_M(x,r,0) = T_0, \quad (4)$$

где T_0 – начальная температура наведенного шлака.

При решении уравнений (3) введем допущения, что шлак является теплоизолированным по поверхности шлак–расплав, теплоотдача проходит только по поверхности радиусом R .

Граничные условия для уравнения (3):

$$T_{uu}(0,t) < \infty; \quad \frac{\partial T_{uu}}{\partial r} = -\alpha_1 T_{uu} \Big|_{r=R}. \quad (5)$$

Рассмотрим решение уравнения (3) с начальными (4) и граничными (5) условиями. Будем искать решение уравнения в виде:

$$T_{uu}(r,t) = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n(t) J_0\left(\frac{\mu_n}{R} r\right), \quad (6)$$

где μ_n – корни характеристического уравнения:

$$\delta(r-r_1)Q^* = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\mu_n^2 Q^* r_1 J_0\left(\frac{\mu_n}{R} r_1\right)}{R^2 [\mu_n^2 + (\alpha_1 R)^2] J_0^2(\mu_n)} J_0\left(\frac{\mu_n}{R} r\right); \quad J_0(z) - \text{функция Бесселя 1-го рода нулевого}$$

порядка, причем $J_0(z) = -J_1(z)$, т.к. $T_1(0,t) < \infty$.

Запишем разложение $\delta(r-r_1)Q^*$ в ряд по функциям Бесселя:

$$\delta(r-r_1)Q^* = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\mu_n^2 Q^* r_1 J_0\left(\frac{\mu_n}{R} r_1\right)}{R^2 [\mu_n^2 + (\alpha_1 R)^2] J_0^2(\mu_n)} J_0\left(\frac{\mu_n}{R} r\right). \quad (7)$$

Тогда, учитывая, что $\int_0^R r J_0\left(\frac{\mu_n}{R} r\right) dr = \frac{R^2}{\mu_n^2} \mu_n J_1(\mu_n)$, получаем:

$$T_0 = 2T_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mu_n^2 J_1(\mu_n)}{[\mu_n^2 + (\alpha_1 R)^2] J_0^2(\mu_n)} J_0\left(\frac{\mu_n}{R} r\right). \quad (8)$$

Подставляя выражения (7) и (8) в (3), получим дифференциальные уравнения для функций $Q_n(t)$:

$$\dot{Q}_n + \left(\frac{a_1 \mu_n}{R}\right)^2 Q_n = 2Q^* \frac{\mu_n^2 r_1 J_0\left(\frac{\mu_n}{R} r_1\right)}{R^2 [\mu_n^2 + (\alpha_1 R)^2] J_0^2(\mu_n)} J_0\left(\frac{\mu_n}{R} r\right), \quad n=1,2,3,\dots, \quad (9)$$

с начальными условиями: $Q_0 = 2T_0 \frac{\mu_n^2 J_1(\mu_n)}{[\mu_n^2 + (\alpha_1 R)^2] J_0^2(\mu_n)}$.

Общее решение запишется:

$$Q_n(t) = C_n e^{-\left(\frac{a_1 \mu_n}{R}\right)^2 t} + \frac{2Q^* r_1}{a_1^2} \frac{J_0\left(\frac{\mu_n}{R} r_1\right)}{[\mu_n^2 + (\alpha_1 R)^2] J_0^2(\mu_n)}. \quad (10)$$

Решая относительно начальных условий, находим:

$$C_n = 2T_0 \frac{\mu_n^2 J_1(\mu_n)}{[\mu_n^2 + (\alpha_1 R)^2] J_0^2(\mu_n)} - \frac{2Q^* r_1}{a_1^2} \frac{J_0\left(\frac{\mu_n}{R} r_1\right)}{[\mu_n^2 + (\alpha_1 R)^2] J_0^2(\mu_n)}. \quad (11)$$

Окончательно решение модельной задачи принимает вид:

$$Q_n(t) = 2T_0 \frac{\mu_n^2 J_1(\mu_n)}{[\mu_n^2 + (\alpha_1 R)^2] J_0^2(\mu_n)} e^{-\left(\frac{a_1 \mu_n}{R}\right)^2 t} + \frac{2Q^* r_1}{a_1^2} \frac{J_0\left(\frac{\mu_n}{R} r_1\right)}{[\mu_n^2 + (\alpha_1 R)^2] J_0^2(\mu_n)} (1 - e^{-\left(\frac{a_1 \mu_n}{R}\right)^2 t}). \quad (12)$$

Тогда аналитическое решение распределения температурного поля в шлаке с учетом (9) и (11) примет окончательный вид:

$$T_{ш}(r,t) = \sum_{n=1}^{\infty} 2T_0 \frac{\mu_n^2 J_1(\mu_n)}{[\mu_n^2 + (\alpha_1 R)^2] J_0^2(\mu_n)} e^{-\left(\frac{a_1 \mu_n}{R}\right)^2 t} + \frac{2Q^* r_1}{a_1^2} \frac{J_0\left(\frac{\mu_n}{R} r_1\right)}{[\mu_n^2 + (\alpha_1 R)^2] J_0^2(\mu_n)} (1 - e^{-\left(\frac{a_1 \mu_n}{R}\right)^2 t}) J_0\left(\frac{\mu_n}{R} r\right). \quad (13)$$

Полученное аналитическое решение динамической математической модели (1) является нелинейным и отражает специфическую тепловую процессу в шлаке для многих электротермических установок. Математическая модель позволяет исследовать изменение

температуры шлака в зависимости от величины мощности на дуге, массы шлака $M_{ш}$. Входными параметрами модели являются удельная теплоемкость шлака, а также подводимая мощность, выходным параметром – температура.

По результатам теоретических исследований процесса теплообмена в замкнутом пространстве печи получены поверхности изменения температуры шлака в процессе нагрева. При решении системы уравнений использована математическая прикладная программа MatLab и встроенная функция PDE. В процессе моделирования приняты следующие параметры: $M_{ш} = 2$ т, $C_{ш} = 0,112$ Дж/°С·кг. [4]. Результаты моделирования приведены на рис. 2.

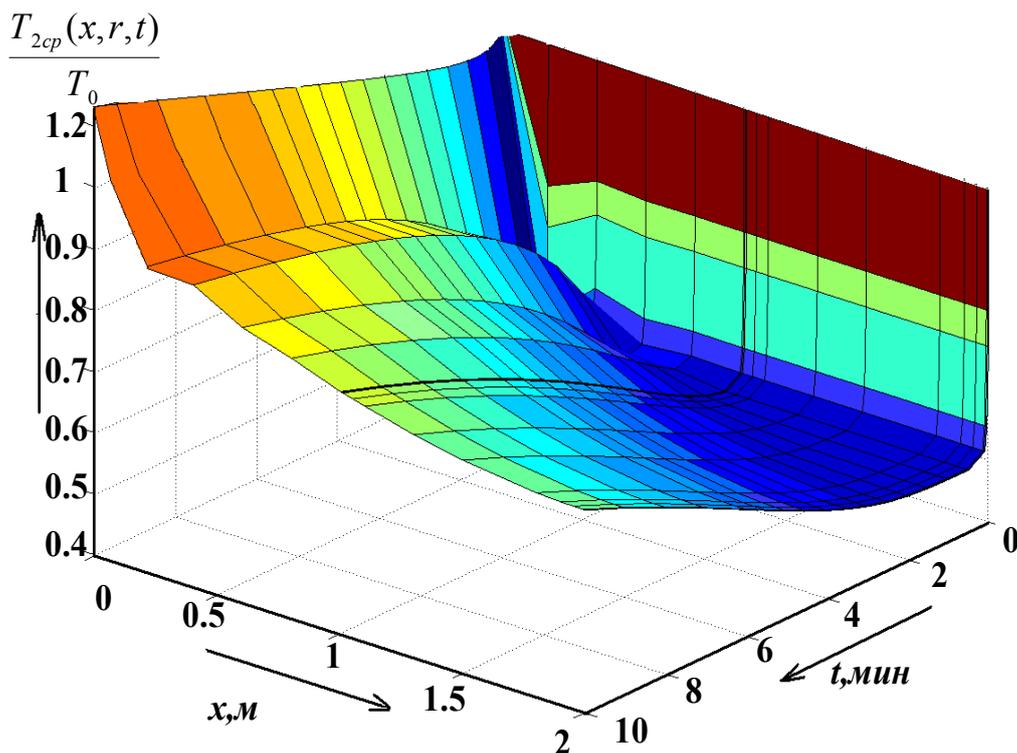


Рис. 2. Распределение температуры шлака по длине при $R = \frac{2}{3} R_{ковша}$

ВЫВОДЫ

Получена математическая модель тепловых параметров шлака восстановительного периода плавки технологического комплекса «Печь-Ковш», которая учитывает изменяющиеся в процессе плавки подводимую от электрической дуги мощность и технологические параметры процесса.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никольский А. Е. Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей / А. Е. Никольский. – М. : Металлургия, 1981. – 320 с.
2. Гитгарц Д. А. Автоматизация плавильных электропечей с применением микро-ЭВМ / Д. А. Гитгарц. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 136 с.
3. Егоров А. И. Основы теории управления / А. И. Егоров. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 504 с.
4. Дьяков В. П. MATLAB 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5. Основы применения. Полное руководство пользователя / В. П. Дьяков. – М. : Солон-Пресс, 2002. – 800 с.

Статья поступила в редакцию 20.10.2012 г.