

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА АЛГОРИТМИ



Разработка математической модели и метода для расчета кинематики плавления металлошихты в рабочем пространстве дуговой сталеплавильной печи

В.Ю. БОЛОТОВ, Е.Н. ЯЛОВАЯ

Днепродзержинский государственный технический университет

Приведена математическая модель процесса расплавления металлической шихты в рабочем пространстве дуговой сталеплавильной печи. Представлены результаты вычислительного эксперимента по исследованию кинематики процесса плавления шихты от тепла электрических дуг и от тепла дуг с применением газокислородных горелок. Установлена возможность снижения расхода электрической энергии и продолжительность плавки за счет применения газокислородных горелок на отдельных стадиях расплавления металлошихты.

Наведена математична модель процесу розплавлення металічної шихті в робочому просторі дугової сталеплавильної печі. Представлено результати обчислювального експерименту по дослідженню кінематики процесу плавлення шихти від тепла електричних дуг та від тепла дуг з використанням газокисневих горілок. Встановлено можливість зниження витрати електричної енергії та тривалості плавки за рахунок застосування газокисневих горілок на окремих стадіях розплавлення металошихти.

There is a mathematical model of melting's process of metal charge in the arc steel-making furnace's working space given. Results of calculating experiment on research of kinematics of charge's melting process from electric arc's heat and from electric arc's heat with use of gas-oxygen burners are presented. A possibility to decrease the rate of electric energy and of melting's duration due to the use of the gas-oxygen burners is established.

Производительность дуговых сталеплавильных печей более чем удвоилась за последние 15 лет, что наряду с другими технико-экономическими параметрами способствовало резкому росту объема выплавки стали в дуговых печах и ее доли в общем объеме производства стали. Интенсивное развитие электросталеплавильного производства было обусловлено тем, что оно требует меньших капиталовложений, отличается более низкими показателями энергоемкости, расходов сырьевых материалов, выбросов в окружающую среду, гибкостью в использовании различных видов металлошихты, быстрее реагирует на изменение потребностей по сортаменту и качеству проката, определяемых рынком потребителей.

Выплавка стали в сверхмощных дуговых сталеплавильных печах является одной из наиболее эффективных энергосберегающих технологий сталеплавильного производства, обеспечивающих производство стали высокого качества. Эффект энергосбережения при электроплавке зависит коренным образом от динамики протекания отдельных периодов расплавления металлошихты, при исследовании которых остались неизученными вопросы:

- взаимное влияние тепловых режимов отдельных стадий тепловой работы печи на динамику протекания теплофизических процессов при расплавлении шихты;
- влияние технологических режимов работы газокислородных горелок, их количества и мощности, состава и вида подачи шихтовых материалов, массы

остатка жидкого металла от предыдущей плавки, интенсивности продувки кислородом жидкометаллической ванны на динамику расплавления шихты в печи;

С целью определения влияния режимов тепловой работы печи на динамику плавления шихты актуальной задачей является разработка универсальной математической модели процесса плавления металлошихты с учетом особенностей современных технологий выплавки стали в ДСП, переменной тепловой мощности электрической дуги на разных стадиях расплавления, интенсификации подогрева металлошихты за счет теплоты газокислородных горелок (в зависимости от их количества и расположения), теплоты экзотермических реакций при окислении элементов, конвективного нагрева шихты печными газами; разработка эффективного метода и программы для расчета на ЭВМ теплового состояния в рабочем пространстве ДСП, промышленная апробация разработанной расчетной методики.

При моделировании процессов теплообмена в ДСП учитываются особенности протекания теплофизических процессов на всех стадиях работы печи: зажигание электрических дуг; проплавление колодцев; плавление закрытыми дугами; доплавление металлошихты. В данном случае опишем наиболее энергоемкие этапы плавления шихты: проплавление колодцев; плавление закрытыми дугами.

Распределение температуры в объеме «болота» на этапе проплавления колодцев описывается уравнением теплопроводности в цилиндрических координатах:

$$c_{\bar{\sigma}} \rho_{\bar{\sigma}} \frac{\partial T_{\bar{\sigma}}}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_{\bar{\sigma}} r \frac{\partial T_{\bar{\sigma}}}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\lambda_{\bar{\sigma}} \frac{\partial T_{\bar{\sigma}}}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{\bar{\sigma}} \frac{\partial T_{\bar{\sigma}}}{\partial z} \right), \quad 0 < z < Z_{\bar{\sigma}} \quad (1)$$

где здесь и в дальнейшем r, φ, z – координаты в цилиндрической системе координат; $0 < r < R_n$; $0 < \varphi < 2\pi$; R_n – радиус печи; $T_{\bar{\sigma}} = f(r, \varphi, z, \tau)$ – температура «болога»; $c_{\bar{\sigma}} = f(T_{\bar{\sigma}})$, $\lambda_{\bar{\sigma}} = f(T_{\bar{\sigma}})$, $\rho_{\bar{\sigma}} = f(T_{\bar{\sigma}})$ – массовая теплоемкость, коэффициент теплопроводности и плотность «болога».

Распределение температуры в объеме шихты описывается уравнением:

$$c_{\text{ш}} \rho_{\text{ш}} \frac{\partial T_{\text{ш}}}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_{\text{ш}} r \frac{\partial T_{\text{ш}}}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\lambda_{\text{ш}} \frac{\partial T_{\text{ш}}}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{\text{ш}} \frac{\partial T_{\text{ш}}}{\partial z} \right) + Q_{\text{зоп}} \quad Z_{\bar{\sigma}} < z < Z_{\text{ш}}, \quad \tau_1 < \tau < \tau_2 \quad (2)$$

где $Q_{\text{зоп}}(r, \varphi, z, \tau)$ – теплота, подводимая к шихте в результате работы топливно-кислородных горелок; $T_{\text{ш}} = f(r, \varphi, z, \tau)$ – температура шихты; $c_{\text{ш}} = f(T_{\text{ш}})$, $\lambda_{\text{ш}} = f(T_{\text{ш}})$, $\rho_{\text{ш}} = f(T_{\text{ш}})$ – массовая теплоемкость, коэффициент теплопроводности и плотность шихты; τ_2 – время окончания второго периода.

Начальным условием для этих уравнений в рассматриваемом периоде является поле температуры для «болога» $T_{\bar{\sigma}}(r, \varphi, z, \tau = \tau_1)$ и шихты $T_{\text{ш}}(r, \varphi, z, \tau = \tau_1)$, полученное в результате решения задачи теплопроводности на этапе зажигания дуг.

На оси симметрии печи задано условие симметрии:

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial T_{\bar{\sigma}}}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \\ \left. \frac{\partial T_{\text{ш}}}{\partial r} \right|_{r=0} = 0 \end{cases}, \quad (3)$$

На границе «болога» – шихта ($z = Z_{\bar{\sigma}}(\tau)$) задано граничное условие IV рода:

$$\begin{cases} \left. \lambda_{\text{ш}} \frac{\partial T_{\text{ш}}}{\partial z} \right|_{z=Z_{\bar{\sigma}}} = \left. \lambda_{\bar{\sigma}} \frac{\partial T_{\bar{\sigma}}}{\partial z} \right|_{z=Z_{\bar{\sigma}}} \\ T_{\text{ш}} \Big|_{z=Z_{\bar{\sigma}}} = T_{\bar{\sigma}} \Big|_{z=Z_{\bar{\sigma}}} \end{cases} \quad (4)$$

На поверхности соприкосновения шихты с футеровкой стен печи или пода заданы граничные условия IV рода:

$$\begin{cases} \left. \lambda_{\text{ш}} \frac{\partial T_{\text{ш}}}{\partial r} \right|_{r=R_{\text{ш}}} = \left. \lambda_{\text{см}} \frac{\partial T_{\text{см}}}{\partial r} \right|_{r=R_{\text{ш}}} \\ T_{\text{ш}} \Big|_{r=R_{\text{ш}}} = T_{\text{см}} \Big|_{r=R_{\text{ш}}} \end{cases}, \quad (5)$$

$$\begin{cases} \left. \lambda_{\text{ш}} \frac{\partial T_{\text{ш}}}{\partial z} \right|_{z=0} = \left. \lambda_{\text{дн}} \frac{\partial T_{\text{дн}}}{\partial z} \right|_{z=0} \\ T_{\text{ш}} \Big|_{z=0} = T_{\text{дн}} \Big|_{z=0} \end{cases}, \quad (6)$$

где $T_{\text{см}} = f(r, \varphi, z, \tau)$, $T_{\text{дн}} = f(r, \varphi, z, \tau)$,

$\lambda_{\text{см}} = f(T_{\text{см}})$, $\lambda_{\text{дн}} = f(T_{\text{дн}})$ – температура стен и пода печи, коэффициент теплопроводности стен и пода печи соответственно.

В зоне пятна дуги (на подвижной границе дна колодца) на поверхности шихты задано граничное условие радиационного теплообмена:

$$-\left. \lambda_{\text{ш}} \frac{\partial T_{\text{ш}}}{\partial z} \right|_{z=Z_{ki}(\tau)} = \quad (7)$$

$$= \varepsilon_{npi} \sigma_0 \left((T_{\text{дуги}} + 273)^4 - (T_{\text{ш}}(z=Z_{ki}(\tau)) + 273)^4 \right)$$

где $i=1, 2, 3$ – номер колодца; $Z_{ki}(\tau)$ – координата поверхности i -того колодца; ε_{npi} – приведенная степень черноты системы «шихта – дуга» i -того колодца.

На верхней поверхности шихты $F_{\text{ш}}(z=Z_{\text{ш}})$ задано условие лучистого теплообмена в результате поглощения лучистой энергии, излучаемой сводом:

$$-\left. \lambda_{\text{ш}} \frac{\partial T_{\text{ш}}}{\partial z} \right|_{z=Z_{\text{ш}}(\tau)} = \quad (8)$$

$$= \varepsilon_{np} \sigma_0 \left((T_{\text{св}} + 273)^4 - (T_{\text{ш}}(z=Z_{\text{ш}}) + 273)^4 \right)$$

где ε_{np} – приведенная степень черноты системы «шихта – свод»; $T_{\text{св}}$ – температура свода.

В выражениях (8) и (9) значение степеней черноты определяется следующим образом [1]:

$$\varepsilon_{npi} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{ш}}} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{дуги}}} - 1}, \quad (9)$$

$$\varepsilon_{np} = \frac{\varepsilon_{\text{ш}} \varepsilon_{\text{св}} (1 - \varepsilon_0)}{B}, \quad (10)$$

где $B = -\varphi_{12} \varphi_{21} (1 - \varepsilon_0)^2 (1 - \varepsilon_{\text{ш}})(1 - \varepsilon_{\text{св}})$,

$\varphi_{12}, \varphi_{21}$ – угловые коэффициенты между поверхностями шихты и сводом и наоборот; $\varepsilon_{ш}, \varepsilon_{\partial yzш}, \varepsilon_{св}$ – степень черноты шихты, дуги и свода соответственно.

Теплота горелок учитывается в модели введением в уравнение теплопроводности (2) для объема шихты объемного источника $Q_{2op}(r, \varphi, z, \tau)$, ($i=1,2,3$ – число горелок).

Распределение температуры в объеме шихты и «болота» на этапе плавления закрытыми дугами описывается соответственно уравнениями теплопроводности для шихты, «болота» и шлаковой прослойки [2]:

$$c_{ш} \rho_{ш} \frac{\partial T_{ш}}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_{ш} r \frac{\partial T_{ш}}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\lambda_{ш} \frac{\partial T_{ш}}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{ш} \frac{\partial T_{ш}}{\partial z} \right) + Q_{экз}(r, \varphi, z, \tau) + Q_{конв}(r, \varphi, z, \tau) + Q_{2op}(r, \varphi, z, \tau) \quad (11)$$

$$Z_{шл} < z < Z_{ш},$$

$$c_{шл} \rho_{шл} \frac{\partial T_{шл}}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_{шл} r \frac{\partial T_{шл}}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\lambda_{шл} \frac{\partial T_{шл}(r, \varphi, z, \tau)}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{шл} \frac{\partial T_{шл}(r, \varphi, z, \tau)}{\partial z} \right) + Q_{\partial yz}(r, \varphi, z, \tau)$$

$$Z_{б} < z < Z_{шл}, \quad (12)$$

$$\frac{\partial T_{б}}{\partial \tau} + v_r \frac{\partial T_{б}}{r \partial r} + v_{\varphi} \frac{\partial T_{б}}{\varphi r \partial \varphi} + v_z \frac{\partial T_{б}}{z r \partial z} = a_{эф} \left(\frac{\partial^2 T_{б}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{б}}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_{б}}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T_{б}}{\partial z^2} \right) + Q_{\partial yz}(r, \varphi, z, \tau) \quad (13)$$

$$0 < z < Z_{б},$$

где $T_{шл}(r, \varphi, z, \tau)$, $\lambda_{шл} = f(T_{шл})$, $\rho_{шл} = f(T_{шл})$ – соответственно температура, коэффициент теплопроводности, плотность шлака; $Q_{экз}(r, \varphi, z, \tau)$ – теплота экзотермических реакций; $Q_{конв}(r, \varphi, z, \tau)$ – теплота, подводимая к шихте конвекцией с отходящими печными газами; $Q_{\partial yz}(r, \varphi, z, \tau)$ – теплота, выделяемая в объеме горячего пятна в шлаке и жидкой ванне; v_r, v_{φ}, v_z – координатные компоненты поля скоростей расплава в объеме жидкой ванны при донной продувке диспергированным аргоном, $a_{эф}$ – эффективный коэффициент температуропроводности в болоте.

Начальным условием для этих уравнений в рассматриваемом периоде является поле температур для

«болота» $T_{б}(r, \varphi, z, \tau = \tau_1 + \tau_2)$ и шихты $T_{ш}(r, \varphi, z, \tau = \tau_1 + \tau_2)$, полученное в результате решения задачи теплопроводности на предыдущем этапе. Температура шлаковой прослойки принимается равной температуре «болота» в конце стадии $T_{б}(r, \varphi, z, \tau = \tau_1 + \tau_2)$.

На оси симметрии печи задано условие симметрии (3). На поверхности соприкосновения шихты с футеровкой стен печи или пода заданы граничные условия IV рода (5), (6).

На границах «болото» – шлак, шлак – шихта заданы граничные условия IV рода:

$$\left\{ \begin{aligned} \lambda_{шл} \frac{\partial T_{шл}}{\partial z} \Big|_{z=Z_{б}} &= \lambda_{б} \frac{\partial T_{б}}{\partial z} \Big|_{z=Z_{б}}, \\ T_{шл} \Big|_{z=Z_{б}} &= T_{б} \Big|_{z=Z_{б}} \end{aligned} \right. \quad (14)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \lambda_{ш} \frac{\partial T_{ш}}{\partial z} \Big|_{z=Z_{шл}} &= \lambda_{шл} \frac{\partial T_{шл}}{\partial z} \Big|_{z=Z_{шл}}, \\ T_{ш} \Big|_{z=Z_{шл}} &= T_{шл} \Big|_{z=Z_{шл}} \end{aligned} \right. \quad (15)$$

Замкнутую систему тел, участвующих в радиационном теплообмене, составляют поверхность свода, поверхность футеровки стен, верхняя поверхность шихты, заполняющий свободное пространство печной газ. Для результирующего излучения любого из серых тел системы, имеем:

$$Q_k^P = \left[(1 - A_i) Q_i^P + Q_i^0 \right] \varphi_{i,k} - (1 - A_k) Q_k^P - Q_k^0, \quad (16)$$

Степень черноты газов, составляющих печную атмосферу на стадии расплавления шихты закрытыми дугами и характеризующих их излучательную способность, согласно [3,4] принято рассчитывать по формуле:

$$\varepsilon_2 = 1 - e^{-k_{эф} \cdot l_{эф}} \quad (17)$$

где $l_{эф}$ – некоторая эффективная длина луча в газовых объемах различной конфигурации, для расчета излучения которых она с достаточной точностью выражается приближенным соотношением:

$$l_{эф} = 3,6 \frac{V}{F} \quad (18)$$

где V – объем излучающей полости, F – поверхность, ограничивающая эту полость.

Прогрев расплава за счет выделяющейся теплоты экзотермических реакций учитывается введением в уравнение (11) источника $Q_{экз}$, который локализован в зоне подачи кислорода и рассчитывается как суммарный тепловой эффект от окисления известной массы вещества.

Дополнительный подогрев шихты печными газами учитывается в математической модели источником

$Q_{конв}(r, \varphi, z, \tau)$ в уравнении (11). Конвективный теплообмен между печными газами, движущимися со скоростью V_z и металлошихтой описывается уравнением:

$$c_2 \rho_2 \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = Q_2, \quad (19)$$

где $T_2 = f(r, \varphi, z, \tau)$ – температура печного газа;

c_2 и ρ_2 – соответственно массовая теплоемкость и плотность газа; $Q_2 = f(r, \varphi, z, \tau)$ – тепловой поток от газа к шихте, описываемый формулой:

$$Q_2 = \alpha_V (T_{ш} - T_2), \quad (20)$$

где α_V – объемный коэффициент теплоотдачи, связь которого с поверхностным коэффициентом теплоотдачи α выражается зависимостью $\alpha_V = \alpha F$, где F – поверхность нагрева, заключенная в единице объема кусковых материалов (m^2). Для вычисления значения поверхностного коэффициента теплоотдачи можно использовать формулу В.Н. Тимофеева, обработавшего данные ряда авторов:

$$Nu = 0,61 Re^{0,67} \alpha = 0,61 \frac{\lambda (v_z \rho_2)^{0,67}}{v^{0,67} d^{0,33}}, \quad (21)$$

где λ – коэффициент теплопроводности печного газа; v – динамический коэффициент вязкости (Па·с); v_z – скорость печного газа.

Для шихты тепловой поток в результате теплообмена с газом определяется из выражения:

$$Q_{ш} = \alpha_V (T_2 - T_{ш}), \quad (22)$$

Расчет процесса расплавления металлошихты в рабочем пространстве дуговой сталеплавильной печи производится путем последовательного расчета теплового состояния на каждой отдельной стадии тепловой работы печи. Трехмерные уравнения теплопроводности с соответствующими начальными и граничными условиями для отдельных стадий расплавления металлошихты заменяются неявными конечно-разностными соотношениями на основании метода контрольного объема. Расчет теплообмена излучением на различных стадиях тепловой работы печи между участвующими в теплообмене поверхностями производится зональным методом. В расчетах не учитывалось перемещение жидкого «болота», то есть принято равенство нулю компонент скорости в уравнении (13). Исследование влияния интенсивности перемешивания «болота» на кинематику плавления металлошихты планируется в последующих работах.

Параметрическую идентификацию математической модели и расчетного алгоритма проводили путем настройки параметров по опытно-промышленным плавкам ДСП-3 Белорусского металлургического завода. При этом невязка баланса составила 0,7-2,5%.

Проведен вычислительный эксперимент по исследованию кинематики плавления металлошихты в рабочем пространстве ДСП. Исследовалась кинематика плавления шихты от тепла электрических дуг и от тепла дуг с применением газокислородных горелок. Основные данные расчетов в виде отдельных статей теплового баланса приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Статьи баланса	Вид технологии	
	Энергия дуг	Энергия дуг и горелок
Тепло, вносимое электрическими дугами, % (отн)	70,7	63,8
Тепло топливных горелок, % (отн)	0	7,9
Расчетный расход электроэнергии, кВтч/Мдж	58042	53900
Расход условного топлива на тонну металла, т	71,3	74,4
Продолжительность расплавления, мин	69	62
Температура в конце периода расплавления, °С	1610	1610

Анализ результатов таблицы 1. позволяет сделать вывод о возможности снижения расхода электрической энергии на 8-10% и продолжительности расплавления на 7-9% путем использования альтернативной энергии газокислородных горелок.

В работе представлена разработанная математическая модель процесса расплавления металлической шихты в рабочем пространстве дуговой сталеплавильной печи. Модель адаптирована по данным опытно-промышленных плавков. Установлена возможность снижения расхода электрической энергии и продолжительность плавки за счет применения газокислородных горелок на отдельных стадиях расплавления металлошихты. В дальнейших работах авторами планируют исследовать влияние перемешивания жидкого «болота» донной аргоновой продувкой на интенсификацию процесса расплавления шихты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Расчет нагревательных и термических печей / В.М. Тымчак, В.Я. Гусовский, - М.: Металлургия, 1983.
2. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах / В.И. Тимошпольский, И.А. Трусова, А.Б. Стеблов, И.А. Павлюченков - Минск, Высшая школа, 1992. -217 с.
3. Математические модели теплообмена в ДСП / И.И. Игнатов. – Математическое моделирование и расчет дуговых и плазменных сталеплавильных печей. Сборник научных трудов// ВНИИЭТО, 1983, С. 17-19.
4. Кривандин В.А., Егоров А.В. Тепловая работа и конструкции печей черной металлургии: Учебник для ВУЗов – М.: 1989, 462 с.

