

УДК 621.783.321.1

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ МНОГОЗОННОЙ МЕТОДИЧЕСКОЙ ПЕЧИ

Инж. ЦКИТИШВИЛИ Э. О.

ОАО «Алчевский металлургический комбинат»

Докт. техн. наук, проф. ТИМОШПОЛЬСКИЙ В. И.,
канд. техн. наук, доц. ТРУСОВА И. А., докт. техн. наук, проф. НЕСЕНЧУК А. П.,
асп. БИОХ И. Г.

Белорусская государственная политехническая академия

Предлагаемая авторами методика усовершенствования теплового режима методической печи толкательного типа выполнена на примере нагрева блюмов сечением 300×300; 310×310; 315×315 мм в нагревательных печах крупносортового стана 600 Алчевского металлургического комбината. Конструктивное оформление методической печи показано на рис. 1. При этом максимальная полезная длина составляет 31,96 м, ширина в свету – 7,66 м, рабочая ширина – 6,5 м. Топливо – природно-коксо-доменная смесь, $Q_n^p = 20,0$ МДж/м³. Печь отапливается 30-ю двухпроводными горелками низкого давления ($p_r = 1,8...2,3$ кПа).

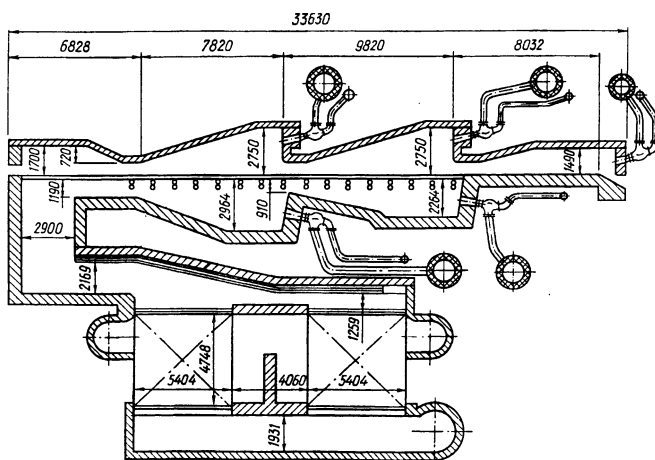


Рис. 1. Конструкция и схема отопления зон печи стана 600

При моделировании тепловой работы печи формулируется задача сопряженного теплообмена, учитывающая специфику конструкции конкретной печи и условия ее функционирования, что позволяет детально исследовать особенности ее тепловой работы в конкретных условиях производства. В этом направлении Белорусской государственной политехнической академией проводятся исследования, результаты которых опубликованы ранее [1, 2].

С учетом того, что показанная на рис. 1 печь отличается достаточно сложной геометрией по кладке, трапецидальная форма сварочных зон требует выработки специального подхода при дискретизации области печного пространства на расчетные зоны. Отметим, что предложенная в [3] замена трапецидальной сварочной зоны на эквивалентную по объему прямоугольную является серьезным упрощением, способным негативно повлиять на достоверность получаемых результатов. Вместе с тем непосредственный учет неклассической формы излучающих поверхностей приводит к принципиальному усложнению математической постановки рассматриваемой задачи [4, 5], что неприемлемо для практики.

В этой работе для учета конструктивных особенностей печи предлагается своего рода промежуточный вариант. Его суть в следующем: наклонная линия трапеции, являющейся поперечным сечением каждой сварочной зоны, заменяется ломаной линией, состоящей из отрезков, сонаправленных с осями декартовой системы координат (рис. 2). Параметры такой замены определяются числом разбиений сварочных зон в осевом направлении, а также реальными габаритами печи. Вторая специфическая особенность конструкции рассматриваемой печи — геометрическая асимметрия в расположении технологических зон верхнего и нижнего строений: в первой и второй сварочных зонах имеет место двухсторонний нагрев, в то время как методическая и томильная зоны фактически являются односторонними.

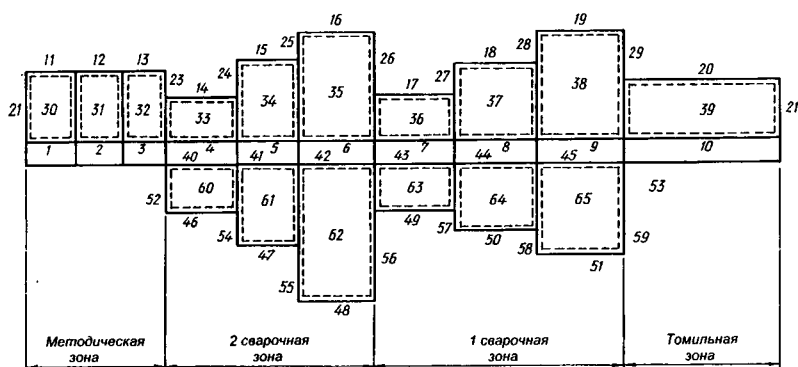


Рис. 2. Расчетная схема задачи нагрева металла в печи

При разбиении на зоны необходимо стремиться к их минимальному количеству при сохранении возможности учета всех основных особенностей теплообмена в печи.

Как видно из рис. 2, даже минимально допустимая дискретизация поверхностей металла, кладки и печного пространства, учитывающая конструктивные особенности рассматриваемой нагревательной печи, приводит к построению зональной модели теплообмена с 65-ю зонами

(верхнее строение – 39, нижнее – 26 зон). Таким образом, математическая модель сводится к решению сопряженной задачи лучисто-кондуктивного теплообмена для системы «верхнее строение печи–модельная полоса металла–нижнее строение печи». С учетом того, что любая задача лучистого теплообмена по своей природе является нелинейной и требует применения итерационных методов решения, использование последних позволяет одновременно решить и проблему увязки решений задач внешнего теплообмена для верхнего и нижнего строений печи.

Базисное решение задачи на одном итерационном шаге требует рассмотрения следующей совокупности уравнений [3].

Система уравнений для расчетных зон II рода, где заданы тепловые потоки:

$$\sum_{k=1}^{N^{\text{в(н)}}} \left(a_{ki}^{\Sigma^{\text{в(н)}}} T_k^{\text{в(н)}} + g_{ki}^{\text{в(н)}} T_k^{\text{в(н)}} \right) + g_i^{0^{\text{в(н)}}} + Q_i^{\nu^{\text{в(н)}}} = 0, \quad i \in N_2^{\text{в(н)}}, \quad (1)$$

где N – общее число зон (для конкретного примера $N = 65$); N_2 – множество номеров зон II рода ($N_2 = \overline{11,39}; \overline{46,65}$).

Формула для вычисления тепловых потоков на поверхностях металла (зоны I рода)

$$Q_i^{\text{в(н)}} = \sum_{k=1}^{N^{\text{в(н)}}} \left(a_{ki}^{\text{в(н)}} T_k^{\text{в(н)}} + g_{ki}^{\text{в(н)}} T_k^{\text{в(н)}} \right) + g_i^{0^{\text{в(н)}}}, \quad i \in N_1, \quad (2)$$

где N_1 – множество номеров зон I рода (зоны на верхней и нижней поверхностях металла, где задается температура) ($N_1 = \overline{1,10}; \overline{40,45}$); a_{ki} , g_{ki} , g_i^0 , Q_i^ν – коэффициенты радиационного (эффективные с учетом селективности излучения) и конвективного теплообмена, а также величины объемных тепловыделений; «в» и «н» – верхнее и нижнее строения печи.

Эффективные коэффициенты лучистого теплообмена a_{ki}^Σ в (1), (2) запишутся следующим образом:

$$a_{ki}^\Sigma = \sum_{m=1}^M \alpha_i^{\lambda_m} a_{ki}^{\lambda_m}. \quad (3)$$

В (3) спектральные коэффициенты лучистого теплообмена a_{ki}^λ определяются с помощью формулы

$$a_{ki}^\lambda = \varepsilon_k \sigma_0 F_k (\Psi_{ki} \varepsilon_i - \delta_{ki}), \quad k, i = \overline{1, N},$$

где степень черноты газов

$$\varepsilon_j = 1 - \exp(-K_j S_j^{\Phi}), \quad j = \overline{30,39}; \overline{60,65},$$

K_j – приведенные коэффициенты поглощения.

Спектральные обобщенные коэффициенты Ψ_{ki} находятся из выражения

$$\Psi_{ki} = \varphi_{ki} \exp(-\sum K_j S_j^{3\phi}), \quad i = \overline{1, N}, \quad K = \overline{1, N}.$$

Для расчета коэффициентов внутреннего теплообмена в (1), (2) запишем:

для объемных зон ($i = \overline{30, 39}; \overline{60, 65}$) –

$$g_{ki} = \begin{cases} 0 & \text{при } k \neq j; k \neq i+1; k \neq i; \\ \alpha F_j & \text{при } k = j; \\ c_{\text{п.с.}} G_{\text{п.с.}} & \text{при } k = i+1; \\ -(\alpha \sum_j F_j + c_{\text{п.с.}} G_{\text{п.с.}}) & \text{при } k = i, \end{cases}$$

для поверхностных зон ($i = \overline{1, 29}; \overline{46, 59}$) –

$$g_{ki} = \begin{cases} 0 & \text{при } k \neq j; k \neq i; \\ \alpha F_i & \text{при } k = j; \\ -\alpha F_i & \text{при } k = i, \end{cases}$$

где j – номер смежной объемной зоны.

С учетом геометрии печи для сокращения общего числа расчетных зон и времени расчета в качестве зон горения в модели были приняты все зоны, принадлежащие собственно технологическим зонам, в которые подается топливо. Таким образом, зоны горения имеют следующие номера: № 33, 34, 35 – II верхняя сварочная зона; № 36, 37, 38 – I верхняя сварочная зона; № 39 – томильная зона; № 60, 61, 62 – II нижняя сварочная зона; № 63, 64, 65 – I нижняя сварочная зона.

В целях учета неравномерности тепловыделения в пределах каждой теплотехнической зоны введены коэффициенты распределения топлива по совокупности зон, аппроксимирующих соответствующую технологическую зону. С учетом изложенного выше распределение общего расхода топлива по выделенным расчетным зонам горения может быть представлено:

II верхняя сварочная зона –

$$G_{\tau_{33}} = G_{\tau} K_{\tau_{\text{св2в}}} \chi_1; \quad G_{\tau_{34}} = G_{\tau} K_{\tau_{\text{св2в}}} \chi_2; \quad G_{\tau_{35}} = G_{\tau} K_{\tau_{\text{св2в}}} \chi_3;$$

I верхняя сварочная зона –

$$G_{\tau_{36}} = G_{\tau} K_{\tau_{\text{св1в}}} \chi_1; \quad G_{\tau_{37}} = G_{\tau} K_{\tau_{\text{св1в}}} \chi_2; \quad G_{\tau_{38}} = G_{\tau} K_{\tau_{\text{св1в}}} \chi_3;$$

томильная зона –

$$G_{\tau_{39}} = G_{\tau} K_{\tau_{\text{том}}};$$

II нижняя сварочная зона —

$$G_{T60} = G_T K_{T_{св2н}} \chi_1; \quad G_{T61} = G_T K_{T_{св2н}} \chi_2; \quad G_{T62} = G_T K_{T_{св2н}} \chi_3;$$

I нижняя сварочная зона —

$$G_{T63} = G_T K_{T_{св2н}} \chi_1; \quad G_{T64} = G_T K_{T_{св2н}} \chi_2; \quad G_{T65} = G_T K_{T_{св2н}} \chi_3,$$

где G_T — общий расход топлива; $K_{T_{св2н}}$, $K_{T_{св1в}}$, $K_{T_{том}}$, $K_{T_{св2н}}$, $K_{T_{св1н}}$ — коэффициенты распределения топлива в зонах печи; χ_1 , χ_2 , χ_3 — коэффициенты, определяющие распределение топлива в пределах верхней и нижней, первой и второй сварочных зон $\left(\sum_{i=1}^3 \chi_i = 1 \right)$.

По аналогии задавалось распределение воздуха по технологическим зонам:

II верхняя сварочная зона —

$$G_{B33} = G_B K_{B_{св2в}} \chi_1; \quad G_{B34} = G_B K_{B_{св2в}} \chi_2; \quad G_{B35} = G_B K_{B_{св2в}} \chi_3;$$

I верхняя сварочная зона —

$$G_{B36} = G_B K_{B_{св1в}} \chi_1; \quad G_{B37} = G_B K_{B_{св1в}} \chi_2; \quad G_{B38} = G_B K_{B_{св1в}} \chi_3;$$

томильная зона —

$$G_{B39} = G_B K_{B_{том}};$$

II нижняя сварочная зона —

$$G_{B60} = G_B K_{B_{св2н}} \chi_1; \quad G_{B61} = G_B K_{B_{св2н}} \chi_2; \quad G_{B62} = G_B K_{B_{св2н}} \chi_3;$$

I нижняя сварочная зона —

$$G_{B63} = G_B K_{B_{св2н}} \chi_1; \quad G_{B64} = G_B K_{B_{св2н}} \chi_2; \quad G_{B65} = G_B K_{B_{св2н}} \chi_3,$$

где G_B — общий расход воздуха; $K_{B_{св2в}}$, $K_{B_{св1в}}$, $K_{B_{том}}$, $K_{B_{св2н}}$, $K_{B_{св1н}}$ — коэффициенты распределения воздуха в зонах печи.

Мощность тепловыделения в указанных зонах горения в рамках принятой расчетной схемы определяем по формуле

$$Q_i^V = Q_{Ti} Q_H^P,$$

где $i = \overline{33,39}; \overline{60,65}$; Q_H^P — теплота сгорания топлива.

Коэффициенты g_i^0 из уравнения (1), где $i = \overline{33,39}; \overline{60,65}$, будут определяться с учетом направления движения продуктов сгорания и расположения технологических зон печи

$$g_i^0 = c_{p_r}(T_T - 273)G_{T_i} + c_{p_b}(T_B - 273)G_{B_i} - c_{p_{п.ср}}(T_{п.ср} - 273)(G_{T_i} + G_{B_i}),$$

где c_{p_r} , c_{p_b} , $c_{p_{п.ср}}$ — теплоемкости соответственно топлива, воздуха, продуктов сгорания; G_T , G_B — расходы соответственно топлива и воздуха в зонах; T_T , T_B — температуры подогрева соответственно топлива и воздуха.

В рамках сопряженной математической модели внешняя задача (1), (2) дополняется внутренней, которая записывается

$$c_p \frac{\partial T_i}{\partial r'} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T_i}{\partial y} \right), \quad i \in N_1, \quad (4)$$

где $r' = x/u$ ($0 \leq x \leq L_i$);

$$-\lambda \frac{\partial T_i}{\partial y} \Big|_{y=-\delta} = \frac{Q_i^H}{F_i}, \quad i \in N_1; \quad (5)$$

$$\lambda \frac{\partial T_i}{\partial y} \Big|_{y=\delta} = \frac{Q_i^B}{F_i}, \quad i \in N_1; \quad (6)$$

$$T_i \Big|_{r'=0} = T_{i-1} \Big|_{r'=L_{i-1}/u}, \quad i \in N_1. \quad (7)$$

Здесь u — скорость движения металла; F_i — площадь условной поверхности i -й зоны металла; δ — половина толщины заготовки.

Представленная на рис. 2 расчетная область позволяет выделить характерный повторяющийся элемент (подобласть, рис. 3). Данная подобласть соответствует в рамках принятой расчетной модели четырем технологическим зонам (первая и вторая сварочные зоны). Приведенная в алгебраическом виде на рис. 3 нумерация расчетных зон, на которые разбивается характерная подобласть, позволяет с единых позиций на программном уровне подойти к вычислению коэффициентов уравнения (1) для всех технологических зон. Именно этим объясняется введение в области нижнего строения дополнительной расчетной зоны № 20, что обеспечивает идентичность первой нижней сварочной зоны прочим трапецидальным зонам. Следует от-

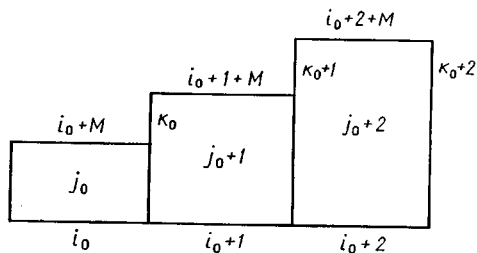


Рис. 3. Дискретизация характерного элемента расчетной области

метить, что после нахождения коэффициентов лучистого теплообмена для всех четырех сварочных зон аналогичные вычисления проводятся и для прочих технологических зон.

Вычислительный алгоритм рассматриваемой задачи следующий.

1. Задание входных параметров, определяющих специфику исследуемого теплотехнологического процесса (геометрия печи, габариты технологических зон, теплофизические характеристики топлива, воздуха, продуктов сгорания, металла, включая их зависимость от температуры, прочие параметры, вычисление которых не связано с температурой металла, кладки, печного пространства).

2. После предварительного задания температур граничных поверхностей металла для областей верхнего и нижнего строений печи решаются задачи внешнего теплообмена, т. е. последовательно решается (1), а затем по (2) находятся тепловые потоки на поверхности металла. Для решения (1) применяется итерационный метод Ньютона.

3. По найденным на поверхностях металла тепловым потокам определяем температурное поле по толщине заготовки. Граничные значения используются в качестве начального приближения при решении задачи внешнего теплообмена на следующем итерационном шаге (п. 2). Пересчет всех теплофизических, радиационных характеристик, зависящих от температурного поля в исследуемой системе.

4. Проверка сходимости полученного решения для температур поверхностей металла с последующим переходом к п. 2, если заданный критерий точности не достигнут, или к п. 5 при его достижении.

5. Формирование на основе полученного температурного поля для заготовок металла массивов выходной информации, имеющей практический интерес, включая представление выходных параметров расчета в удобном для пользователя виде.

Алгоритм решения описанной выше математической модели базируется на известной итерационной схеме решения задач сопряженного лучисто-кондуктивного теплообмена. Согласно этой схеме решение задачи внешнего теплообмена устанавливает распределение удельного теплового потока на поверхности металла, отвечающее заданному распределению температуры на этой поверхности, затем в результате решения задачи внутреннего теплообмена при заданном на поверхности заготовки тепловом потоке происходит уточнение поверхностного распределения температуры и т. д. до достижения приемлемого критерия сходимости.

При построении алгоритма решения рассматриваемой задачи за основу возьмем расчетную схему, приведенную ранее для исследования нагрева металла в толкательной методической печи. Для решения системы для верхнего строения, содержащей в качестве неизвестных температуры зон II рода ($i = 11, 12, \dots, 39$), преобразуем ее, выделив в каждом уравнении сумму первых 10-ти слагаемых, определяемых известными температурами зон на поверхности металла:

$$Z_i = \sum_{k=1}^{10} (a_{ki}^{\Sigma} T_k^4 + g_{ki} T_k), \quad i = 1, \dots, 10. \quad (8)$$

Подстановка (8) в (1) приводит к уравнению

$$\sum_{k=11}^{39} (a_{ki}^{\Sigma} T_k^4 + g_{ki} T_k) + g_i^0 + Q_i^V + Z_i = 0, \quad i = \overline{11,39}. \quad (9)$$

Применяя для решения системы зональных уравнений (9) итерационный метод Ньютона, обозначим их левые части через $\Phi_i (T_{11}, T_{12}, \dots, T_{39})$, $i = \overline{11,39}$ и найдем частные производные функций Φ_i по температурам $T_k (k = \overline{11,39})$. При дифференцировании примем, что коэффициенты радиационного обмена a_{ki}^{Σ} постоянны. Их зависимость от температуры учитывается с отставанием на шаг в итерационном алгоритме решения системы (9), т. е. они вычисляются по температуре, полученной на предыдущей итерации. С учетом данного допущения формулы для вычисления производных примут вид

$$\frac{\partial \Phi_i}{\partial T_k} = 4a_{ki}^{\Sigma} T_k^3 + g_{ki}, \quad i = \overline{11,39}.$$

Следующим шагом является решение системы линейных уравнений относительно смещений температуры

$$\frac{\partial \Phi_i}{\partial T_{11}} \Delta T_{11} + \dots + \frac{\partial \Phi_i}{\partial T_{39}} \Delta T_{39} = \Phi_i, \quad i = \overline{11,39}.$$

Далее находим новое приближение для температурного поля по формуле

$$T_i^* = T_i - \Delta T_i, \quad i = \overline{11,39}.$$

После проверки условия удовлетворения относительной погрешности температур на двух последовательных итерациях заданному критерию вся процедура решения системы (1) либо повторяется, либо заканчивается. Когда температурное поле в зонах II рода найдено, по нему с использованием (2) вычисляются тепловые потоки в зонах I рода, т. е. на верхней поверхности металла.

Аналогично решается задача внешнего теплообмена для нижнего строения печи, в результате которой определяются тепловые потоки на нижней поверхности металла.

Для решения задачи внутреннего теплообмена аппроксимируется уравнение теплопроводности (4) с помощью неявной конечно-разностной схемы

$$c_l \rho_l \frac{T_i^n - T_i^{n-1}}{\Delta \tau'} = \frac{1}{h_l} \left(\lambda_{l+\frac{1}{2}} \frac{T_{i+1}^n - T_i^n}{h_l^+} - \lambda_{l-\frac{1}{2}} \frac{T_i^n - T_{i-1}^n}{h_l^-} \right); \quad i \in N_1, \quad (10)$$

где

$$h_l^+ = y_{l+1} - y_l; \quad h_l^- = y_l - y_{l-1}; \quad h_l = \frac{1}{2} (h_l^+ + h_l^-);$$

$$\lambda_{l+\frac{1}{2}} = \lambda \left(\frac{T_{i+1}^{n-1} + T_i^{n-1}}{2} \right); \quad \lambda_{l-\frac{1}{2}} = \lambda \left(\frac{T_i^{n-1} + T_{i-1}^{n-1}}{2} \right).$$

Краевые условия (5)...(7) аппроксимируются следующим образом:

$$-\lambda_L \frac{T_{i_2}^n - T_{i_1}^n}{h_1^+} = 0, \quad i \in N_1; \quad (11)$$

$$\lambda_L \frac{T_{i_L}^n - T_{i_{L-1}}^n}{h_L^-} = \frac{Q_i}{F_i}, \quad i \in N_1;$$

$$T_{1_l}^0 = T_{0_m}.$$

Систему разностных уравнений (10) решаем методом прогонки. Для этого (10) представим в виде

$$A_l T_{i_{l-1}}^n - C_l T_{i_l}^n + B_l T_{i_{l+1}}^n = -F_l, \quad (12)$$

где

$$A_l = \frac{1}{h_l} \frac{\lambda_{i-1/2}}{h_l^-}; \quad B_l = \frac{1}{h_l} \frac{\lambda_{i+1/2}}{h_l^+}; \quad C_l = A_l + B_l + \frac{c_l \rho_l}{\Delta \tau'}; \quad F_l = c_l \rho_l \frac{T_{i_l}^{n-1}}{\Delta \tau'}.$$

Формулы прямого хода прогонки имеют вид:

$$\alpha_{l+1} = \frac{B_l}{C_l - A_l \alpha_l}; \quad \beta_{l+1} = \frac{A_l B_l + F_l}{C_l - A_l \alpha_l}.$$

Начальные коэффициенты прогонки задаются из граничного условия (11):

$$\alpha_1 = 1; \quad \beta_1 = \frac{\lambda_1 Q_i^H}{F_i}.$$

Температура

$$T_{i_L} = \frac{\beta_L + h_L^- Q_i^B / \lambda_L}{\alpha_L}.$$

Обратный ход прогонки реализуется с помощью рекуррентного соотношения

$$T_{i_l} = \alpha_{l+1} T_{i_{l+1}} + \beta_{l+1}, \quad l = \overline{1, L-1}.$$

Итак, решение рассматриваемой задачи реализует итерационный алгоритм последовательного решения внешней (9) и внутренней (12) задач теплообмена.

Отметим, однако, что при определенных соотношениях задаваемых значений технологических параметров процесса этот алгоритм может

приводить к физически противоречивым результатам, причиной которых является одновременное выполнение на каждой итерации двух условий сопряжения температурных полей в печи и металла на поверхности заготовок. В самом деле, согласно данному алгоритму на каждом итерационном шаге выполняется одно из условий сопряжения: равенство температурных полей или тепловых потоков, затем они последовательно чередуются. В тех случаях, когда тепловые нагрузки на металл достаточно велики, после решения внешней задачи теплообмена на поверхности заготовки могут быть получены настолько большие тепловые потоки, что согласно решению внутренней задачи теплопроводности поверхность металла достигнет температуры, превышающей температуру газов в прилегающей объемной зоне. Это в свою очередь приводит к неверному решению внешней задачи теплообмена на следующей итерации, и далее итерационный процесс расходится. Для предотвращения таких случаев на основе численной апробации в общий алгоритм решения сопряженной задачи теплообмена была включена процедура релаксации, которая использовалась при вычислении значений температуры поверхности металла на каждом итерационном шаге. Согласно методу релаксации имеем

$$T_{m,j}^{(k)} = \gamma_j T_{m,j}^{(k)} + (1 - \gamma_j) T_{m,j}^{(k-1)},$$

где $T_{m,j}^{(k)}$ — температура металла в j -й зоне на k -й итерации; γ — параметр релаксации. Наличие индекса у величины γ означает, что в случае необходимости параметр релаксации на основе численного эксперимента может быть подобран индивидуально для каждой зоны. Его после настройки по промышленному эксперименту задавали следующей зависимостью:

$$\gamma_j = 0,5 - 0,4(j - 1)/(J - 1); \quad j = \overline{1, J},$$

где J — число зон разбиения по направлению движения металла ($J = 10$). Как показал проведенный вычислительный эксперимент, применение метода релаксации позволило увеличить скорость сходимости общего итерационного алгоритма решения рассматриваемой задачи и в большинстве случаев получить физически непротиворечивые результаты.

Приведенная математическая модель сопряженного теплообмена прошла параметрическую идентификацию по данным промышленного эксперимента, проведенного в условиях работы методической печи стана 600 АМК [6]. Промышленный эксперимент проведен при следующих условиях: размер блюмов — $300 \times 300 \times 6000$ мм, производительность печи — 145 т/ч, расход топлива — 15100 м³/ч. Результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных представлены на рис. 4, из которого видна удовлетворительная сходимость термограмм.

В соответствии с выполненным объемом исследований усовершенствованы технико-экономические показатели тепловой работы методической печи стана 600 ОАО «Алчевский металлургический комбинат» (табл. 1).

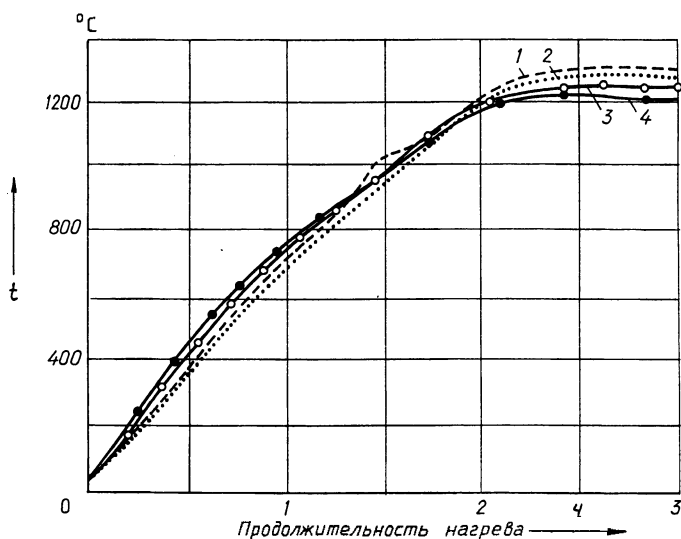


Рис. 4. Изменение температур верхней (1 – расчет; 3 – эксперимент) и нижней (2 – расчет; 4 – эксперимент) поверхностей заготовки при нагреве в методической печи

Таблица 1

Показатель	Действующий режим	Предлагаемый режим
Удельный расход условного топлива, кг у. т./т $b = \frac{BQ_p^H}{7000 \cdot P}$ (B – расход топлива, P – производительность)	$\frac{17788 \cdot 4800}{7000 \cdot 120} = 101,6$	$\frac{16820 \cdot 4800}{7000 \cdot 118,8} = 97,09$
Коэффициент полезного действия печи (технический), % $\eta = \frac{Q_{\text{пол}} \cdot 100}{\Sigma Q_{\text{прих}}}$ (Q _{пол} – теплота, расходуемая на нагрев металла; ΣQ _{прих} – приход теплоты)	$\frac{24,296 \cdot 10^6}{99,635 \cdot 10^6} \times 100 = 24,38$	$\frac{23,98 \cdot 10^6}{94,36 \cdot 10^6} \times 100 = 25,41$
Коэффициент использования топлива, % $\eta_{\text{и.т}} = \frac{Q_{\text{х.т}} + Q_{\text{физ.в}} - Q_{\text{г.ух}}}{Q_{\text{х.т}}} \times 100$ (Q _{х.т} – теплота сгорания топлива; Q _{физ.в} – теплота подогретого воздуха; Q _{г.ух} – теплота с уходящими дымовыми газами)	$\frac{(85,342 + 11,403 - 38,765) \cdot 10^6}{85,342 \cdot 10^6} \times 100 = 67,9$	$\frac{(80,736 + 10,783 - 36,656) \cdot 10^6}{80,736 \cdot 10^6} \times 100 = 67,95$

Анализ технико-экономических показателей тепловой работы методической печи стана 600 показывает, что при работе по предлагаемому режиму удельный расход условного топлива может быть снижен на

$\Delta b = (101,6 - 97,09) = 4,51$ кг у. т./т; коэффициент полезного действия печи (технологический) увеличен на 4,05 %, окалинообразование снижено с 1,8 до 1,78 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. М а т е м а т и ч е с к о е моделирование нагрева заготовок в печи с шагающими балками (сопряженная постановка) / В. И. Завелион, Р. Б. Вайс, И. А. Трусова и др. // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1993. – № 1–2. – С. 113–117.
2. И с с л е д о в а н и е технологии нагрева непрерывнолитых заготовок высокоуглеродистых сталей в печах с шагающими балками / В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова, П. П. Петух и др. // Сталь. – 1995. – № 4.
3. А р у т ю н о в В. А., Б у х м и р о в В. В., К р у п е н н и к о в С. А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей. – М.: Metallurgia, 1990. – С. 234.
4. А н д р и а н о в В. Н. Основы радиационного и сложного теплообмена. – М.: Энергия, 1972.
5. О ц и с и к М. Н. Сложный теплообмен. – М.: Мир, 1976.
6. И с с л е д о в а н и е нагрева металла в пятияzonных методических печах / В. В. Антонов, Г. Ф. Подольская, Н. А. Кияшко и др. // Сталь. – 1970. – № 1. – С. 81–84.

Представлена техническим советом
ОАО «Алчевский металлургический комбинат»

Поступила 2.04.2001

УДК 669.012.9

РАЗРАБОТКА РАЦИОНАЛЬНОЙ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИИ НАГРЕВА КОРДОВОЙ СТАЛИ В ПРОХОДНОЙ ПЕЧИ СТАНА 850 РУП «БМЗ»

Инж. ФИЛИППОВ В. В., докт. техн. наук, проф. **ТИМОШПОЛЬСКИЙ В. И.,**
инж. ТИЩЕНКО В. А., канд. техн. наук **КОЗЛОВ С. М.,**
канд. техн. наук, доц. ТРУСОВА И. А., инж. **РАТНИКОВ П. Э.**

*Республиканское унитарное предприятие «Белорусский металлургический завод»,
Белорусская государственная политехническая академия*

Флагман белорусской металлургии — Республиканское унитарное предприятие «Белорусский металлургический завод» (РУП «БМЗ») является общепризнанным мировым лидером в области выпуска высококачественного металлокорда со сверхпрочными характеристиками. На предприятии с 1999 г. в рамках научно-технического сотрудничества с Белорусской государственной политехнической академией возобновились комплексные экспериментально-теоретические исследования на сталеплавильных и прокатных агрегатах завода, в том числе по освоению кордовой стали с содержанием углерода более 0,85 % (90К, 85К, 100К).

Дуореверсивный стан 850 Республиканского унитарного предприятия «Белорусский металлургический завод» предназначен для производства