



The results of mathematical modeling of the heat exchange processes in the furnaces with mechanized bottom (of mills 850, 320, 150 furnaces) of Belorussian metallurgical works are given in the present articles.

В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, И. А. ТРУСОВА, С. М. КАБИШОВ, БНТУ

УДК 621.783

ТЕПЛОВАЯ РАБОТА НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ ПРОКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА В ПРОМЫШЛЕННЫХ УСЛОВИЯХ. СООБЩЕНИЕ 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОЙ РАБОТЫ В ПЕЧАХ С МЕХАНИЗИРОВАННЫМ ПОДОМ

Введение. В настоящее время развиваются две тенденции при математическом моделировании тепловой работы нагревательных проходных печей [1, 2].

1. Разработка комплексных (сопряженных) математических моделей, включающих процессы внешнего и внутреннего теплообмена, движение теплоносителей, несимметричность нагрева, учет геометрии заготовок, конструктивных особенностей и т. д.

С помощью таких моделей представляется возможным исследовать закономерности и взаимосвязи тепловых процессов, недоступные прямым экспериментальным исследованиям.

2. Разработка математических моделей, которые позволяют изучить процессы теплообмена путем разделения комплекса происходящих в печи явлений на отдельные группы. Такой подход, хотя и предполагает некоторые упрощения в исходной постановке задачи, позволяет, тем не менее, акцентировать внимание на детальном исследовании и анализе какой-либо группы процессов (например, изучение динамики внутреннего теплообмена, расчеты угловых коэффициентов, температурных деформаций и напряжений и др.).

Ввиду значительной сложности теплообменных процессов в металлургических печах точное их математическое описание связано с определенными трудностями. Поэтому при моделировании сопряженного теплообмена в печах исследователь сталкивается с необходимостью записи крайне сложной системы уравнений, при этом для адекватности моделей реальным процессам при описа-

нии внутреннего теплообмена используются двух-, а иногда и трехмерные уравнения теплопроводности, учитывается значительное количество зависимых и независимых переменных и др.

В настоящей работе приведены результаты математического моделирования процессов теплообмена в печах с механизированным подом (печи станов 850, 320, 150) Белорусского металлургического завода.

В печах с механизированным подом длинномерные заготовки (прямоугольные или квадратные) располагаются на поду с определенными зазорами, поэтому при математической постановке необходимо рассматривать задачу теплопроводности в двухмерной постановке. В соответствии с изложенным выше рассмотрим математическое моделирование внутреннего и сопряженного теплообмена при нагреве заготовок в печах с шагающими балками и шагающим подом.

Математическая модель внутреннего теплообмена при нагреве заготовок. Математическая модель описывается следующей системой уравнений [1, 2]:

уравнение теплопроводности:

$$\rho(T)c(T)\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial y} \right], \quad (1)$$

где $-R \leq x \leq R$; $-R \leq y \leq R$; $0 \leq \tau < \infty$;

граничное условие:

$$\lambda(T)\frac{\partial T(R; y(x); \tau)}{\partial x} = \sigma_{\text{печ}} \left[T_{\text{печ}}^4 - T^4(R; y(x); \tau) \right] + \alpha \left[T_{\text{печ}} - T(R; y(x); \tau) \right]; \quad (2)$$

условие симметрии:

$$\frac{\partial T(0; y; \tau)}{\partial x} = 0 \quad \text{и} \quad \frac{\partial T(x; 0; \tau)}{\partial y} = 0; \quad (3)$$

начальное условие:

$$T(x; y; 0) = f(x; y). \quad (4)$$

Здесь $\rho(T)$, $c(T)$, $\lambda(T)$ – плотность, теплоемкость и теплопроводность стали; $\sigma_{\text{печ}}$, α – коэффициенты теплообмена излучением и конвекцией; $T_{\text{печ}}$ – температура печи.

Приведенная математическая модель (1)–(4) решалась методом конечных разностей. Основной трудностью при решении таких задач является выбор коэффициентов внешнего теплообмена. На рис. 1 в качестве примера приведены результаты сравнения математической модели по данным промышленного эксперимента с целью подбора коэффициентов $\sigma_{\text{печ}}$ и $\alpha_{\text{к}}$. Из рисунка видна достаточная для последующих расчетов точность. Учитывая, что теплообмен в высокотемпературных нагревательных печах осуществляется в основном за счет излучения [3, 4], коэффициент теплообмена конвекцией в соответствии с литературными данными приняли равным 50–60 Вт/(м²·К), коэффициент теплообмена излучением по данным идентификации изменяется по длине печи от 2,5 до 2,8 Вт/(м²·К⁴).

Математическая модель (1)–(4) использована для усовершенствования проектных режимов нагрева непрерывнолитых и катаных заготовок сече-

нием 250×300 мм конструкционных (прежде всего, трубных) и кордовых марок сталей в печи с шагающими балками 850. При этом в зависимости от производительности печи (от 45 до 70 т/ч) удельный расход условного топлива находится на уровне 41–43 кг у. т./т, коэффициент полезного действия – 0,65–0,7, коэффициент использования топлива – 0,73–0,78.

Математическая модель сопряженного теплообмена при нагреве заготовок. Как выше было отмечено, основную трудность при решении задач теплообмена в печах представляет определение коэффициентов внешнего теплообмена. Задача сопряженного теплообмена предполагает постановку и совместное решение внешней и внутренней задач теплообмена.

В качестве исходных данных принимаются следующие величины:

а) геометрические параметры – размеры заготовок, высота свода печи, длины методической, сварочной, томильной зон;

б) технологические параметры – начальная температура металла, производительность печи, расходы топлива и воздуха, теплота сгорания топлива, распределение расхода топлива по зонам печи, температура подогрева топлива и воздуха, состав основных продуктов сгорания, коэффициенты теплоотдачи к поверхности кладки и металла, расстояние металла и кладки, предельно допустимые температуры нагрева металла по зонам печи;

в) теплофизические параметры – зависимости теплопроводности, теплоемкости, плотности металла; продуктов сгорания от температуры.

Примем некоторые допущения, характерные для подобных задач [5]:

- температура металла, кладки и дымовых газов постоянны по ширине печи;
- тепловые потери через кладку принимаются равными тепловому потоку конвективной теплоотдачи от продуктов сгорания к внутренней поверхности футеровки, поэтому лучистую составляющую результирующего теплового потока на этой поверхности примем равной нулю;
- для всех поверхностных зон металла и кладки соответствующие коэффициенты конвективной теплоотдачи имеют постоянные значения.

Состав продуктов сгорания постоянен по всему печному пространству и их средняя удельная теплоемкость не зависит от температуры.

Моделирование сопряженного теплообмена в нагревательной печи стана 320 БМЗ. Результаты выполненных экспериментальных исследований [6] показали, что нагрев заготовок сечением 125×125 мм

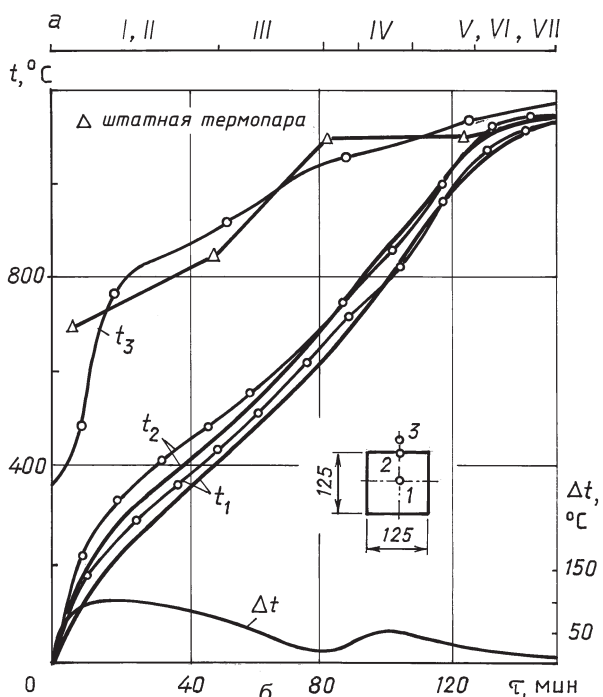


Рис. 1. Изменение температур при нагреве заготовок из стали 70К сечением 125×125 мм в печи стана 320: а – базовый режим; б – разработанный режим (—○— эксперимент; — — — расчет)

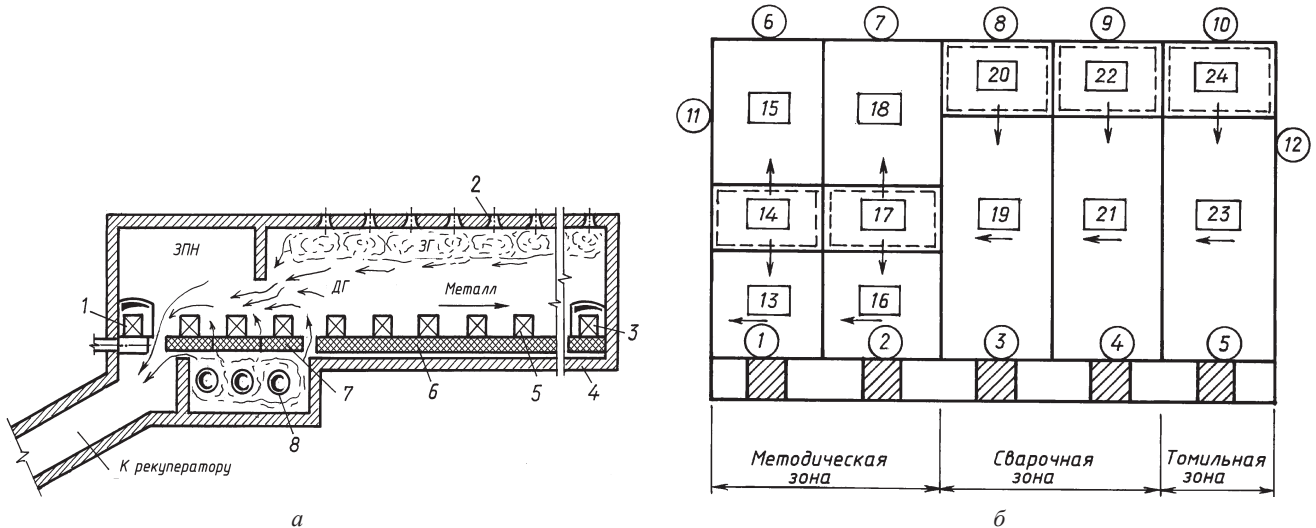


Рис. 2. Схема нагревательной печи стана 320 (а) и разбиения рабочего пространства на расчетные зоны (б)

в печи стана 320 является практически симметричным. В соответствии с этим на рис. 2 приведена соответствующая расчетная схема печи 320.

Очевидно, что дискретный характер расположения заготовок приводит к необходимости решения задачи радиационно-конвективного теплообмена для системы сложной конфигурации. Для решения задачи применим двухэтапный метод расчета: на первом этапе дискретная поверхность заготовок заменяется условной плоскостью, что позволяет построить и реализовать традиционную зональную модель теплообмена. Характер отопления печи (боковое в зоне шагающего пода, сводовое в зоне шагающих балок) определяет расположение в представленной на рис. 2, а расчетной схеме зон горения, а также основные направления движения газов.

Принципиальным при построении модели задачи является рациональный выбор числа расчетных зон по тракту печи. С учетом имеющегося опыта решения подобных задач в осевом направлении печь разбиваем на пять расчетных участков, тогда общее число расчетных зон при реализации первого этапа решения составляет 24 (рис. 2, б).

Математическую формулировку запишем в следующем виде.

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

$$\sum_{k=1}^N \left(a_{ki}^{\Sigma} T_k^4 + g_{ki} T_k \right) + g_i^0 + Q_i^v = 0, \quad i \in N_2, \quad (5)$$

где N – общее число зон (для конкретного примера $N = 24$); N_2 – множество номеров зон II рода ($N_2 = \overline{6, 24}$).

Формула для вычисления тепловых потоков на поверхностях металла (зоны I рода, где задается температура):

$$Q_i = \sum_{k=1}^N \left(a_{ki} T_k + g_{ki} T_k \right) + g_i^0, \quad i \in N_1, \quad (6)$$

где N_1 – множество номеров зон I рода, $N_1 = \overline{1, 5}$ (при этом предполагается, что дискретная поверхность металла заменена условной плоскостью); a_{ki} , g_{ki} , g_i^0 , Q_i^v – коэффициенты радиационного (эффективные с учетом селективности излучения) и конвективного теплообмена, а также величины объемных тепловыделений.

Эффективные коэффициенты радиационного теплообмена a_{ki}^{Σ} в формулах (5), (6) запишутся следующим образом:

$$a_{ki}^{\Sigma} = \sum_{m=1}^M \alpha_i^{\lambda_m} a_{ki}^{\lambda_m}. \quad (7)$$

Спектральные коэффициенты радиационного теплообмена a_{ki}^{λ} :

$$a_{ki}^{\lambda} = \varepsilon_k \sigma_0 F_k (\Psi_{ki} \varepsilon_i - \delta_{ki}), \quad k, i = \overline{1, N}, \quad (8)$$

где степень черноты газов $\varepsilon_j = 1 - \exp(-K_j S_j^{\Phi})$, $j = \overline{13, 24}$; K – приведенные коэффициенты поглощения.

Спектральные обобщенные коэффициенты Ψ_{ki} :

$$\Psi_{ki} = \varphi_{ki} \exp(-\sum_j K_j S_j^{\Phi}); \quad i = \overline{1, N}, \quad K = \overline{1, N}. \quad (9)$$

Для определения коэффициентов конвективно-го теплообмена в выражениях (5), (6) для объемных и поверхностных зон запишем:

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

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

где j – номер смежной объемной зоны.

С целью учета неравномерности тепловыделения в пределах каждой теплотехнической зоны вводили коэффициенты распределения топлива и воздуха.

Мощность тепловыделения в зонах горения в рамках принятой расчетной схемы будет рассчитываться по формуле

$$Q_i^V = G_{T_i} Q_H^P \quad (10)$$

где $i = 14, 17, 20, 22, 24$; Q_H^P – теплота сгорания топлива; G_{T_i} – расход топлива в зонах с учетом коэффициента распределения по совокупности зон.

Коэффициенты g_i^0 из уравнения (6) будут определяться с учетом направления движения продуктов сгорания и расположения технологических зон печи

$$g_i^0 = c_{p_T} (T_T - 273) G_{T_i} + c_{p_B} (T_B - 273) G_{B_i} - c_{p_{п.сг}} (T_{п.сг} - 273) (G_{T_i} + G_{B_i}), \quad (11)$$

где $c_{p_T}, c_{p_B}, c_{p_{п.сг}}$ – 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.

С учетом того, что на первом этапе дискретная поверхность заготовок заменена на условную поверхность, дополним внешнюю задачу (5)–(11) внутренней задачей, которая записывается следующим образом:

$$c_p \frac{\partial T_i}{\partial t'} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T_i}{\partial y} \right), \quad i \in N_1, \quad (12)$$

где $t' = x/u$ ($0 \leq x \leq L_i$);

$$-\lambda \frac{\partial T_i}{\partial y} \Big|_{y=-\delta} = \frac{Q_i^{<1}}{F_i}, \quad i \in N_1, \quad (13)$$

$$\lambda \frac{\partial T_i}{\partial y} \Big|_{y=\delta} = \frac{Q_i^2}{F_i}, \quad i \in N_1, \quad (14)$$

$$T_i \Big|_{t'=0} = T_{i-1} \Big|_{t'=L_{i-1}/u}, \quad i \in N_1. \quad (15)$$

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

Второй этап учитывает, что заготовки на поду печи расположены с зазором. Учитывая, что при формулировке локальных зональных моделей в качестве начального распределения искомых функций используется решение, найденное на первом

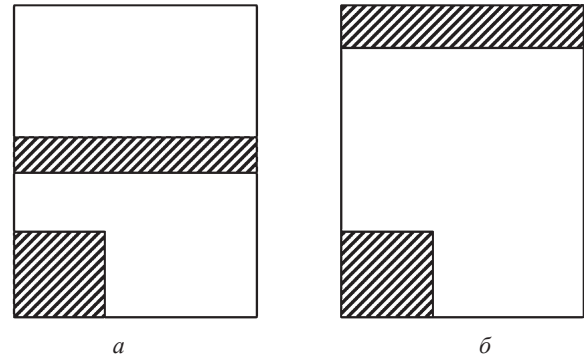


Рис. 3. Локальная зональная модель ко второму этапу решения сопряженной задачи теплообмена в печи стана 320: а – в методической зоне; б – в сварочной и томильной зонах

этапе, которое уже включает конвективный перенос в печи, на втором этапе для каждого участка внешняя задача становится задачей только лучистого теплообмена, т. е. решение исходной задачи (5)–(15) состоит в корректировке результатов расчета первого этапа с учетом переизлучения между заготовками, лежащими на поду печи с зазором. Для этого каждый из выделенных участков печи заменяем соответствующей локальной зональной моделью (рис. 3), отражающей основные механизмы теплообмена излучением.

Поскольку целью расчета на втором этапе является детализация температурного поля металла, допустимо пренебречь изменением температуры кладки и соответствующего участка печного пространства за счет реальной геометрии заготовок. Тогда задачу внешнего теплообмена можно свести к явным формулам для вычисления тепловых потоков, падающих на заготовку:

$$Q_i^l = \sum_{k=1}^{N_l} a_{ki}^{\Sigma l} \bar{T}_k^4, \quad i = 1, 2; l \in N_1. \quad (16)$$

Здесь $i = 1, 2$ означает соответственно горизонтальную и вертикальную плоскости заготовки; N_l – общее число зон в локальной модели.

Внутренняя задача теплообмена на втором этапе расчета с учетом условий симметрии сводится к двумерной задаче нестационарной теплопроводности для 1/4 поперечного сечения заготовки:

$$\rho(T)c(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right], \quad l \in N_1, \quad (17)$$

$$\frac{\partial T_i}{\partial y} \Big|_{y=0} = \frac{\partial T_i}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \quad l \in N_1, \quad (18)$$

$$\lambda(T) \frac{\partial T_l}{\partial y} \Big|_{y=\delta_y} = \frac{Q_l^1}{F_l}, \quad l \in N_1, \quad (19)$$

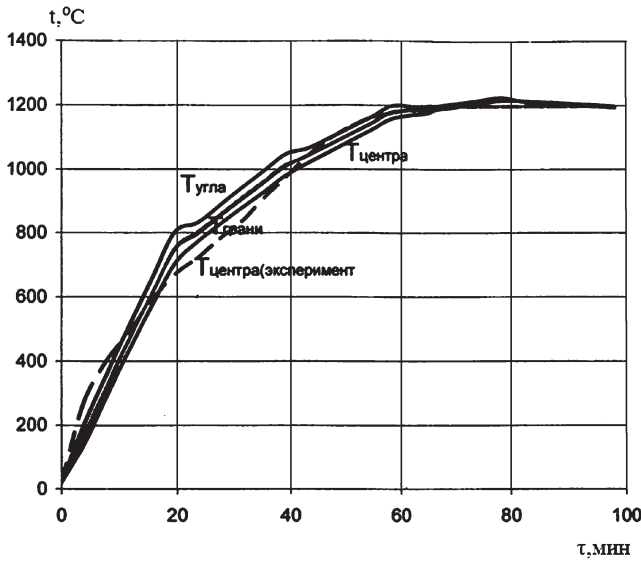


Рис. 4. Изменение температур при нагреве заготовки (сталь Ст3) сечением 125×125 мм в печи стана 320: — — расчет; — — — эксперимент

$$\lambda(T) \frac{\partial T_l}{\partial z} \Big|_{z=\delta_z} = \frac{Q_2^l}{F_2}, l \in N_1, \quad (20)$$

$$T_l \Big|_{\tau'=0} = T_{l-1} \Big|_{\tau'=L_{i-1}/u}, l \in N_1. \quad (21)$$

Результаты параметрической идентификации математической модели (5)–(21) приведены на рис. 4.

Моделирование сопряженного теплообмена в нагревательной печи стана 850 БМЗ. При разработке математической модели сопряженного теплообмена в печи стана 850 учтен двухсторонний нагрев прямоугольных заготовок сечением 250×300, 300×400 мм, при этом, как показали результаты экспериментальных исследований [6], нагрев является несимметричным. Расчетная схема печи представлена на рис. 5, 6.

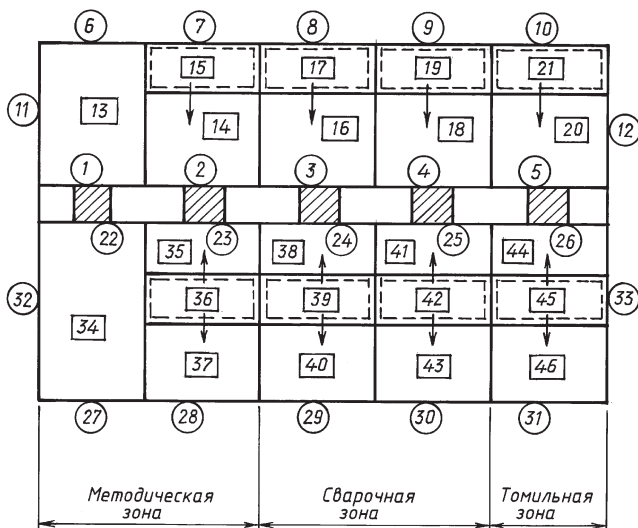


Рис. 6. Зональная модель сопряженного теплообмена в нагревательной печи стана 850

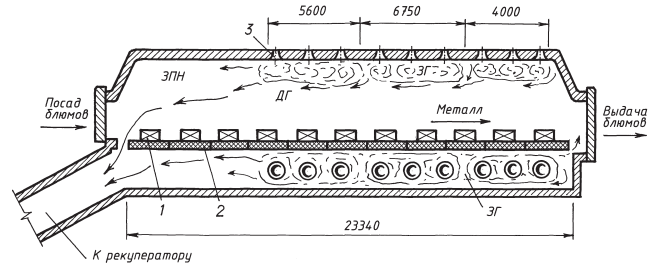


Рис. 5. Схема нагревательной печи стана 850 РУП «БМЗ»: 1 – заготовка; 2 – шагающие балки; 3ПН – зона предварительного нагрева; ДГ – дымовые газы

Система уравнений для рассматриваемого случая теплообмена аналогична системе уравнений (5)–(16) с учетом разбиения печи на 46 зон (рис. 6). По аналогии с математическим моделированием тепловой работы печи стана 320 использован двухэтапный метод расчета, при этом на втором этапе учтена несимметричность нагрева. Модель внутреннего теплообмена на втором этапе (1), (3) дополнена краевыми условиями:

$$\lambda \frac{\partial T_l}{\partial y} \Big|_{y=0} = -\frac{Q_1^l}{F_1}, l \in N_1, \quad \lambda \frac{\partial T_l}{\partial y} \Big|_{y=a} = -\frac{Q_2^l}{F_2}, l \in N_1, \quad (22)$$

$$\lambda \frac{\partial T_l}{\partial z} \Big|_{z=b/2} = -\frac{Q_3^l}{F_3}, l \in N_1, \quad \frac{\partial T_l}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, l \in N_1, \quad (23)$$

где b – ширина заготовки.

Учитывая, что режимы работы нагревательной печи стана 850 предусматривают организацию как холодного, так и горячего посада заготовок, параметрическую настройку математической модели осуществляли для обоих видов посада. Результаты идентификации модели приведены на рис. 7, 8.

Математическое моделирование сопряженного теплообмена в нагревательной печи стана 150. Схема нагревательной печи стана 150 представлена на рис. 9, расчетная схема, включающая 34 зоны, – на рис. 10. Математическая модель сопряженного теплообмена, как и в предыдущих случа-

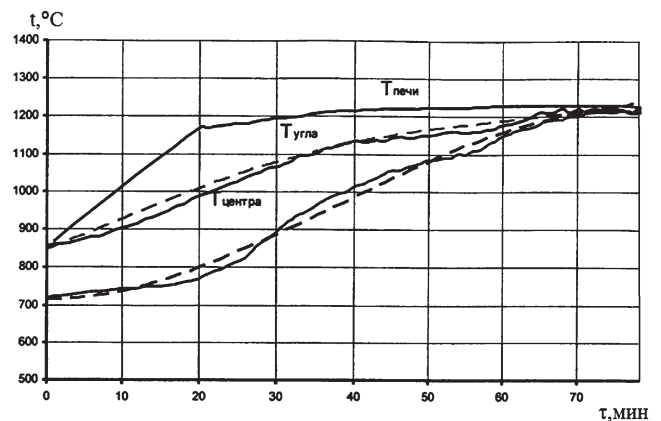


Рис. 7. Изменение температур при нагреве заготовки (сталь ШХ15СГ) сечением 250×300 мм с горячего посада в печи стана 850: — — эксперимент — — — расчет

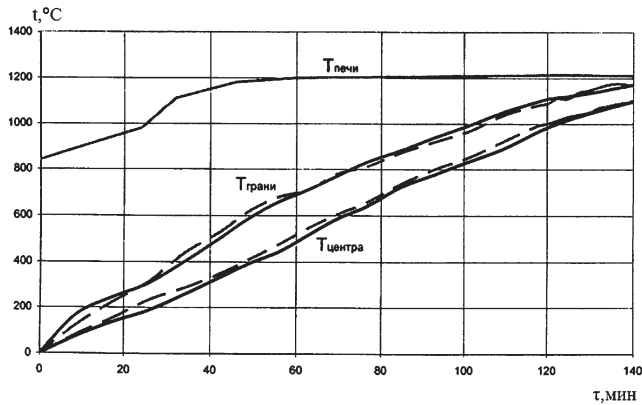


Рис. 8. Изменение температур при нагреве заготовки (сталь 70К) сечением 250×300 мм с холодного посада в печи стана 850: — — эксперимент — — — расчет

ях, описывается системой нелинейных алгебраических уравнений (5)–(16), внутренняя задача идентична задаче для печи стана 320.

Разработка рациональных режимов нагрева в печах прокатного производства БМЗ. Разработанные математические модели сопряженного теплообмена использованы для разработки температурных режимов нагрева заготовок сечением 250×300 и 125×125 мм в печах станов 850 и 320 при освоении рессорных марок сталей (на примере 50ХГФА) для последующего изготовления мало- и многолистовых рессор и высокоуглеродистых марок сталей (на примере стали для изготовления специальных видов проволоки, стали 80К), а также при усовершенствовании действующих режимов нагрева для существующего марочного состава.

С использованием математической модели внутреннего теплообмена (1)–(4) разработаны в период освоения проектной мощности стана 850 рациональные режимы нагрева заготовок, позволившие снизить удельный расход топлива на 3 кг у. т./т, окалинообразование – на 3,5 кг/т.

При использовании математических моделей сопряженного теплообмена усовершенствованы существующие температурные режимы нагревательных печей станов 850, 320 и 150 при тепловой

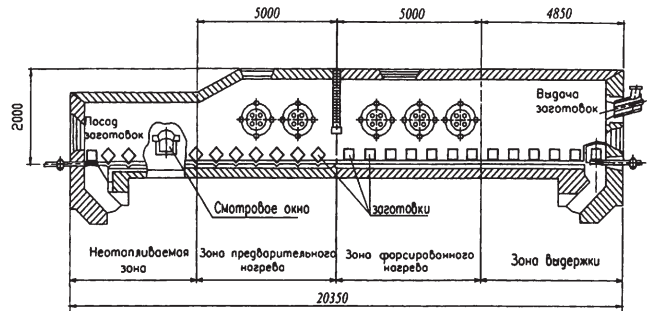


Рис. 9. Схема нагревательной печи стана 150

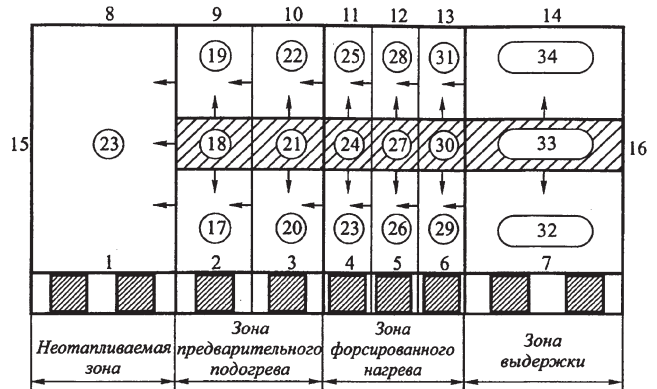


Рис. 10. Расчетная схема зональной модели сопряженного теплообмена в нагревательной печи стана 150

обработке всего марочного состава сталей, производимых в условиях БМЗ.

В качестве примера приведем результаты разработки рациональных режимов нагрева, выполненные в период 2002–2003 гг. Расчет тепловых балансов и технико-экономических показателей тепловой работы печей (удельный расход условного топлива b и КПД), результаты которого приведены в табл. 1–9, проведен по трем вариантам: действующий, предлагаемый и форсированный режим (с учетом возникающих термических напряжений).

Анализ расчетных данных показал, что разработанные рациональные режимы позволяют снизить удельный расход условного топлива и количество окалины за счет сокращения времени нагрева заготовок в печах прокатного производства БМЗ. При этом получены следующие показатели в зависимости от марки стали и профиля проката:

Таблица 1. Тепловой баланс нагревательной печи стана 320 (заводской режим)

Приход теплоты	МВт	%	Расход теплоты	МВт	%
1. Химическая теплота топлива	37,97	84,71	1. На нагрев металла	23,21	51,78
2. Теплота подогретого воздуха	5,71	12,74	2. Потери с уходящими газами	14,25	31,79
3. Теплота экзотермических реакций	1,14	2,55	3. Потери от химического недожога	0,15	0,33
			4. Потери через кладку	2,94	6,56
			5. Потери с охлаждающей водой	3,15	7,03
			6. Потери с окалиной	0,33	0,73
			7. Потери через окна	0	0
			8. Неучтенные потери	0,80	1,78
ВСЕГО	44,82	100	ВСЕГО	44,82	100

Производительность 102,7 т/ч, сталь 35ГС, $b = 45,5$ кг у. т./т, КПД = 0,588

Т а б л и ц а 2. Тепловой баланс нагревательной печи стана 320 (предлагаемый режим)

Приход теплоты	МВт	%	Расход теплоты	МВт	%
1. Химическая теплота топлива	37,85	85,01	1. На нагрев металла	23,23	52,18
2. Теплота подогретого воздуха	5,69	12,78	2. Потери с уходящими газами	14,20	31,90
3. Теплота экзотермических реакций	0,98	2,21	3. Потери от химического недожога	0,15	0,33
			4. Потери через кладку	2,92	6,56
			5. Потери с охлаждающей водой	2,98	6,68
			6. Потери с окалиной	0,28	0,63
			7. Потери через окна	0	0
			8. Неучтенные потери	0,76	1,71
ВСЕГО	44,52	100	ВСЕГО	44,52	100

Производительность 102,7 т/ч, сталь 35ГС, $b = 45,25$ кг у. т./т, КПД = 0,589

Т а б л и ц а 3. Тепловой баланс нагревательной печи стана 320 (форсированный режим)

Приход теплоты	МВт	%	Расход теплоты	МВт	%
1. Химическая теплота топлива	41,30	85,07	1. На нагрев металла	25,82	53,18
2. Теплота подогретого воздуха	6,21	12,79	2. Потери с уходящими газами	15,50	31,92
3. Теплота экзотермических реакций	1,04	2,14	3. Потери от химического недожога	0,16	0,33
			4. Потери через кладку	2,93	6,03
			5. Потери с охлаждающей водой	3,06	6,31
			6. Потери с окалиной	0,30	0,61
			7. Потери через окна	0	0
			8. Неучтенные потери	0,78	1,61
ВСЕГО	48,55	100	ВСЕГО	48,55	100

Производительность 114,1 т/ч, сталь 35ГС, $b = 44,44$ кг у. т./т, КПД = 0,595

Т а б л и ц а 4. Тепловой баланс нагревательной печи стана 150 (заводской режим)

Приход теплоты	МВт	%	Расход теплоты	МВт	%
1. Химическая теплота топлива	22,00	83,47	1. На нагрев металла	15,09	57,27
2. Теплота подогретого воздуха	3,70	14,03	2. Потери с уходящими газами	7,11	26,97
3. Теплота экзотермических реакций	0,66	2,50	3. Потери от химического недожога	0,39	1,47
			4. Потери через кладку	0,83	3,15
			5. Потери с охлаждающей водой	2,28	8,63
			6. Потери с окалиной	0,19	0,71
			7. Потери через окна	0	0
			8. Неучтенные потери	0,47	1,77
ВСЕГО	26,35	100	ВСЕГО	26,35	100

Производительность 68,7 т/ч, сталь 70К, $b = 39,28$ кг у. т./т, КПД = 0,573

Т а б л и ц а 5. Тепловой баланс нагревательной печи стана 150 (предлагаемый режим)

Приход теплоты	МВт	%	Расход теплоты	МВт	%
1. Химическая теплота топлива	21,87	83,46	1. На нагрев металла	15,09	57,58
2. Теплота подогретого воздуха	3,68	14,03	2. Потери с уходящими газами	7,07	26,97
3. Теплота экзотермических реакций	0,66	2,51	3. Потери от химического недожога	0,39	1,47
			4. Потери через кладку	0,83	3,17
			5. Потери с охлаждающей водой	2,19	8,35
			6. Потери с окалиной	0,19	0,72
			7. Потери через окна	0	0
			8. Неучтенные потери	0,45	1,73
ВСЕГО	26,21	100	ВСЕГО	26,21	100

Производительность 68,7 т/ч, сталь 70К, $b = 39,06$ кг у. т./т, КПД = 0,576

Таблица 6. Тепловой баланс нагревательной печи стана 150 (форсированный режим)

Приход теплоты	МВт	%	Расход теплоты	МВт	%
1. Химическая теплота топлива	23,12	83,03	1. На нагрев металла	15,89	57,07
2. Теплота подогретого воздуха	4,07	14,60	2. Потери с уходящими газами	7,68	27,59
3. Теплота экзотермических реакций	0,66	2,37	3. Потери от химического недожога	0,41	1,47
			4. Потери через кладку	0,86	3,08
			5. Потери с охлаждающей водой	2,33	8,38
			6. Потери с окалиной	0,19	0,68
			7. Потери через окна	0	0
			8. Неучтенные потери	0,48	1,72
ВСЕГО	27,84	100	ВСЕГО	27,84	100

Производительность 72,35 т/ч, сталь 70К, $b = 39,22$ кг у. т./т, КПД = 0,571

Таблица 7. Тепловой баланс нагревательной печи стана 850 (заводской режим)

Приход теплоты	МВт	%	Расход теплоты	МВт	%
1. Химическая теплота топлива	25,92	83,39	1. На нагрев металла	15,22	48,95
2. Теплота подогретого воздуха	4,56	14,67	2. Потери с уходящими газами	8,97	28,85
3. Теплота экзотермических реакций	0,604	1,94	3. Потери от химического недожога	0,18	0,59
			4. Потери через кладку	1,06	6,30
			5. Потери с охлаждающей водой	3,77	12,12
			6. Потери с окалиной	0,08	0,26
			7. Потери через окна	0,17	0,55
			8. Неучтенные потери	0,74	2,37
ВСЕГО	31,08	100	ВСЕГО	31,08	100

Производительность 66,38 т/ч, сталь 70К, $b = 47,93$ кг у. т./т, КПД = 0,688

Таблица 8. Тепловой баланс нагревательной печи стана 850 (предлагаемый режим)

Приход теплоты	МВт	%	Расход теплоты	МВт	%
1. Химическая теплота топлива	25,111	83,97	1. На нагрев металла	15,22	50,89
2. Теплота подогретого воздуха	4,222	14,12	2. Потери с уходящими газами	8,12	27,14
3. Теплота экзотермических реакций	0,573	1,92	3. Потери от химического недожога	0,18	0,59
			4. Потери через кладку	1,87	6,26
			5. Потери с охлаждающей водой	3,57	11,94
			6. Потери с окалиной	0,08	0,26
			7. Потери через окна	0,17	0,57
			8. Неучтенные потери	0,70	2,35
ВСЕГО	29,906	100	ВСЕГО	29,91	100

Производительность 66,38 т/ч, сталь 70К, $b = 46,44$ кг у. т./т, КПД = 0,698

Таблица 9. Тепловой баланс нагревательной печи стана 850 (форсированный режим)

Приход теплоты	МВт	%	Расход теплоты	МВт	%
1. Химическая теплота топлива	27,634	81,22	1. На нагрев металла	16,58	48,72
2. Теплота подогретого воздуха	5,731	16,84	2. Потери с уходящими газами	10,25	30,13
3. Теплота экзотермических реакций	0,659	1,94	3. Потери от химического недожога	0,20	0,57
			4. Потери через кладку	2,00	5,89
			5. Потери с охлаждающей водой	3,97	11,66
			6. Потери с окалиной	0,09	0,26
			7. Потери через окна	0,17	0,51
			8. Неучтенные потери	0,77	2,27
ВСЕГО	34,025	100	ВСЕГО	34,02	100

Производительность 72,4 т/ч, сталь 70К, $b = 46,84$ кг у. т./т, КПД = 0,697

- в печи стана 150 удельный расход условного топлива уменьшился на 0,25–0,53 кг у. т./т, количество окалины – на 0,3–0,4 кг/т;

- в печи стана 320 расход топлива снизился на 0,4–0,8 кг у. т./т, количество окалины – на 0,4–0,5 кг/т;

- в печи стана 850 достигнуто снижение расхода топлива на 0,7–1,25 кг у. т./т, окалинообразования – на 0,4–0,7 кг/т.

Помимо отмеченных экономических аспектов, как показали промышленные испытания, новые

режимы дают возможность более гибко и оперативно управлять нагревательными устройствами при изменении производительности, профиля проката, марки стали и в случае внеплановых простоев. Это также способствует уменьшению общего расхода природного газа и снижению уровня окалинообразования.

По результатам исследования внесены изменения в действующие технологические инструкции нагрева заготовок в печах станов 850, 320, 150 Белорусского металлургического завода.

Литература

1. Тимошпольский В. И. Теплотехнологические основы металлургических процессов и агрегатов высшего технического уровня. Мн.: Навука і тэхніка, 1995.
2. Стальной слиток. В 3-х т. Т. 3. Нагрев / В. И. Тимошпольский и др.; под общ. ред В. И. Тимошпольского, Ю. А. Самойловича. Мн.: Белорусская наука, 2001.
3. Металлургические печи. Теория и расчеты: Учеб. В 2-х т. Т. 1 / В. И. Губинский и др.; под общ. ред. В. И. Тимошпольского, В. И. Губинского. Мн.: Белорусская наука, 2007.
4. Металлургические печи. Теория и расчеты: Учеб. В 2-х т. Т. 2 / В. И. Губинский и др.; под общ. ред. В. И. Тимошпольского, В. И. Губинского. Мн.: Белорусская наука, 2007.
5. 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.: Металлургия, 1990.
6. Т и м о ш п о л ь с к и й В. И., Т р у с о в а И. А. Тепловая работа нагревательных печей прокатного производства в промышленных условиях. Сообщение 2. Экспериментальные исследования при нагреве заготовок в печах с механизированным подом // Литье и металлургия. 2011. № 1. С. 62–71.