

ПРИОРИТЕТНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ В ОБЛАСТИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

О. В. ДУБИНА, Криворожский государственный горно-металлургический комбинат, В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, БГПА, А. К. ГОЛУБЧЕНКО, Ассоциация металлургических предприятий Украины, В. И. ГУБИНСКИЙ, Национальная металлургическая академия Украины, Б. С. СОРОКА, Институт газа НАН Украины, М. П. РЕВУН, Запорожская государственная инженерная академия, Ю. С. ПОСТОЛЬНИК, Днепродзержинский государственный технический университет, В. В. ФИЛИППОВ, РУП "БМЗ", В. М. ОЛЬШАНСКИЙ, Национальная металлургическая академия Украины, И. А. ТРУСОВА, БГПА

КОМПЛЕКСНЫЕ СОВМЕСТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ТЕОРИИ И ТЕХНОЛОГИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА — ОДНО ИЗ НАПРАВЛЕНИЙ ИНТЕГРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

В рамках тесного научного сотрудничества между металлургическими предприятиями и организациями Украины и Беларуси выполнялись комплексные исследования, направленные на усовершенствование работы металлургических агрегатов, разработку ресурсо- и энергосберегающих технологических процессов при формировании слитков и непрерывных заготовок, их нагреве, термической обработке, прокатке и т.д., что в свою очередь является реализацией Программы долгосрочного экономического сотрудничества между Украиной и Республикой Беларусь на 1999—2008 гг. в соответствии с Договором "Об экономическом сотрудничестве между Украиной и Республикой Беларусь", подписанного президентами Л. Кучмой и А. Лукашенко 12 декабря 1998 г. В проведении исследований принимали участие ведущие специалисты и ученые Днепровского металлургического комбината им. Дзержинского, Белорусского металлургического завода, Алчевского металлургического комбината, Криворожского государственного горно-металлургического комбината, Белорусской государственной политехнической академии, Национальной металлургической академии Украины, Института газа НАН Украины, Днепродзержинского государственного технического университета.

Выделим основополагающие разработки, касающиеся энерго- и ресурсосбережения в технологических процессах металлургических переделов. Следует отметить, что при изучении всех без исключения металлургических процессов авторами использован комплексный (системный) подход, включающий в себя чередование экспериментальных и теоретических исследований и позволяющий учесть наиболее существенные факторы при дальнейшей разработке оптимальных технологических режимов. При проведении исследований использован современный арсенал знаний в области теории и технологии металлургического производства: методы математической физики и термомеханики, приближенных (инженерные) методы расчета процессов затвердевания и нагрева, методы термического анализа и др.

В работах [1—9] приведены результаты исследований, направленных на изучение и усовершенствование режимов затвердевания, охлаждения и нагрева крупных бьюминговых слитков. Разработана методика экспериментальных исследований с целью изучения поля температур в затвердевающем бьюминговом слитке в условиях Днепровского металлургического комбината (ДМК) [1—4]. Отличительной чертой проведенных промышленных экспериментов явился учет технологических особенностей, присущих Днепровскому металлургическому комбинату. Методика измерения отличается высокой надежностью и малой инерционностью защиты термопар от агрессивного физико-химического воздействия расплавленной стали. Экспериментальные исследования были использованы при параметрической настройке математической модели совмещенного теплотехнологического процесса "затвердевание в изложнице—охлаждение на воздухе—нагрев в ячейке нагревательного колодца", включающей расчет поля температур, напряжений и деформаций [3—8]:

$$c_1(T_1)\rho_1(T_1)\frac{\partial T_1}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_1(T_1)\frac{\partial T_1}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_1(T_1)\frac{\partial T_1}{\partial y}\right),$$

$$c_2(T_2)\rho_2(T_2)\frac{\partial T_2}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_2(T_2)\frac{\partial T_2}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_2(T_2)\frac{\partial T_2}{\partial y}\right), \quad (2)$$

$$T_1|_{\tau=0} = T_{01}, \quad T_2|_{\tau=0} = T_{02}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial T_1}{\partial x}\Big|_{x=0} = 0, \quad \frac{\partial T_1}{\partial y}\Big|_{y=0} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial x}\Big|_{x=0} = 0, \quad \frac{\partial T_2}{\partial y}\Big|_{y=0} = 0, \quad (5)$$

$$\lambda_1\frac{\partial T_1}{\partial x}\Big|_{x=l_1} = \alpha(T_2 - T_1), \quad \lambda_1\frac{\partial T_1}{\partial y}\Big|_{y=l_1} = \alpha(T_2 - T_1), \quad (6)$$

$$\lambda_1\frac{\partial T_1}{\partial y}\Big|_{y=l_1} = \alpha(T_2 - T_1), \quad \lambda_2\frac{\partial T_2}{\partial y}\Big|_{y=l_2} = \alpha(T_2 - T_1), \quad (7)$$

$$\lambda_2\frac{\partial T_2}{\partial x}\Big|_{x=l_1+d} = \alpha_{\text{лс}}(T - T_2), \quad \lambda_2\frac{\partial T_2}{\partial y}\Big|_{y=l_2+d} = \alpha_{\text{лс}}(T - T_2), \quad (8)$$

где индексы "1", "2", "в" относятся к слитку, изложнице и внешней среде; ρ , c , λ , T — соответственно плотность, теплоемкость, теплопроводность и температура; T_{01} — температура заливаемого металла; T_{02} — температура изложницы в начальный момент времени; l_1 и l_2 — половина толщины сечения слитка, выбираемая соответственно по оси OX и OY ; d — толщина стенки изложницы; $\alpha_{\text{лс}}$ — коэффициент лучистого теплообмена между внешней поверхностью изложницы и внешней средой.

Система уравнений для расчета напряжений и деформаций имеет вид

$$\Delta\sigma_{ij} = 0, \quad (9)$$

$$\Delta\varepsilon_{ij} = \Delta\varepsilon_{ij}^e + \Delta\varepsilon_{ij}^p + \Delta\varepsilon_{ij}^c + \delta_{ij}\Delta\varepsilon^T, \quad (10)$$

$$-\Delta\varepsilon_{ki,jn} + \Delta\varepsilon_{kj,in} + \Delta\varepsilon_{ni,jk} - \Delta\varepsilon_{nj,ik} = 0, \quad (11)$$

$$\Delta\sigma_{ij}n_i = \Delta f_i. \quad (12)$$

Для компонент приращения упругой деформации $\Delta\varepsilon_{ij}^e$ и температурного расширения $\Delta\varepsilon^T$ с учетом зависимости механических свойств от температуры:

$$\Delta\varepsilon_{ij}^e + \delta_{ij}\Delta\varepsilon^T = \frac{1}{E}\left((1 + \mu)\Delta\sigma_{ij} - 3\mu\delta_{ij}\Delta\sigma\right) + \left(\delta_{ij}\frac{d\varepsilon^T}{dT} - \frac{1}{E^2}\frac{dE}{dT}\left((1 + \mu)\sigma_{ij} - 3\mu\delta_{ij}\sigma\right) + \frac{1}{E}\frac{d\mu}{dT}\left(\sigma_{ij} - 3\mu\delta_{ij}\sigma\right)\right)\Delta T, \quad (13)$$

$$\sigma = \sigma_{ij} / 3. \quad (14)$$

Приращение пластической деформации

$$\Delta\varepsilon_{ij}^p = (F_\sigma(\sigma_i, T)\Delta\sigma_i + F_T(\sigma_i, T)\Delta T)S_{ij}, \quad (15)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{3}{2}S_{ij}S_{ij}}, \quad S_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma, \quad F_\sigma(\sigma_i, T) = \frac{3}{2\sigma_i}\left(\frac{1}{E_\kappa} - \frac{1}{E(T)}\right),$$

$$F_T(\sigma_i, T) = \frac{3}{2\sigma_i}\left(\beta + \frac{\sigma_i}{E^2}\frac{dE}{dT}\right).$$

Касательный модуль E_κ и коэффициент температурных расширений β являются функциями температуры и интенсивности напряжений σ .

В выражениях (13)—(15) μ — коэффициент Пуассона; E — модуль упругости, вычисляемый по экспериментально полученным диаграммам $\sigma - \varepsilon$:

$$v_{ij} = \frac{3}{2}\beta(T)\sigma_i^{m(T)-1}S_{ij}. \quad (16)$$

Анализ результатов многовариантных расчетов, проведенных с использованием разработанной математической модели (1)—(16), позволил установить ряд закономерностей по влиянию различных факторов на временные характеристики совмещенного технологического процесса (толщина стенки изложницы, газовый зазор, тепловое состояние слитка в момент посадки в нагревательное устройство и т.д.). Впервые в теории расчетов охлаждения и нагрева на примере совмещенного процесса слитка выполнен анализ многих известных математических моделей температурных напряжений [3, 7]. Итогом проведенных исследований явились инженерные номограммы для определения параметров нагрева слитка с жидкой сердцевиной [4, 7, 8], апробация и внедрение разработанного трехступенчатого температурно-теплового режима нагрева слитков горячего посада [9] в условиях ДМК, что позволило увеличить выход годного от 94 до 98% и уменьшить удельный расход условного топлива.

В связи с широким внедрением и освоением машин непрерывной разливки сталей значительное внимание уделяется изучению закономерностей формирования непрерывнолитых заготовок. По существу данного вопроса необходимо отметить работы [3, 4, 10—18]. При освоении проектных мощностей и нового марочного сортамента сталей Белорусского металлургического завода сотрудниками Белорусской государственной политехнической академии под руководством профессора В. И. Тимошпольского проведены многочисленные эксперименты (порядка 25 опытов), направленные на изучение температурных полей мелко- и среднесортных непрерывнолитых заготовок, разливаемых на МНЛЗ современных конструкций [11—13]. Большая часть экспериментальных результатов проанализирована и обобщена в монографии В.И.Тимошпольского [14]. Следует отметить, что количество подобных исследований, проведенных к настоящему времени другими специалистами, весьма незначительно, что объясняется большими методическими трудностями. В связи с этим результаты экспериментальных измерений были широко использованы при отработке рациональных режимов непрерывной разливки сталей (скорость разливки, температура разливки и т.д.) в период освоения машин непрерывного литья заготовок на ДМК [15, 16]. Результаты освоения новых марок сталей, в том числе на комбинированной МНЛЗ последнего поколения, где одновременно сочетается разливка заготовок крупных и малых сечений, обобщены в монографии [10]. В работе [17] приведены результаты расчета температурных полей и термических напряжений в растущей корочке непрерывнолитой заготовки. Наряду с численными методами при расчете процессов формирования крупных слитков и непрерывнолитых заготовок широко используются аналитические методы: Лейбензона и Вейника, конформных отображений, метод эквивалентных источников Постольника (например, [3, 18, 19]) и др.

При исследовании процессов тепловой обработки металлов использовано многообразие математических методов решения нелинейных задач. Разработаны оригинальные математические модели сопряженного (внешнего и внутреннего) теплообмена в печах современной конструкции [3, 14, 20—23], математические модели нагрева пластин (блюмов), сплошных и полых цилиндров, комплексные математические модели процессов нагрева, окалинообразования и обезуглероживания [24—41] и др.

Математические модели сопряженного теплообмена разработаны для печей различного конструктивного оформления. Решение задачи внешнего теплообмена сводилось к решению нелинейных алгебраических уравнений теплового баланса:

$$\sum_{k=1}^N (a_{ki}^{\Sigma} \bar{T}_k^4 + g_{ki} \bar{T}_k) + g_i^0 + Q_i^V = 0, \quad i \in N_2 \quad (17)$$

для зон второго рода. Здесь N — общее число зон; N_2 — множество номеров зон второго рода.

Тепловые потоки на поверхности металла вычисляются по явным формулам

$$Q_i = \sum_{k=1}^N (a_{ki}^{\Sigma} \bar{T}_k^4 + g_{ki} \bar{T}_k) + g_i^0, \quad i \in N_1, \quad (18)$$

где N_1 — множество номеров узлов зон первого рода.

Внутренняя задача теплообмена записывалась как традиционное уравнение теплопроводности. Так, в [3, 14, 20—22] приведены результаты исследования тепловой работы нагревательных печей с шагающими балками и шагающим подом станов 320/150 и 850, функционирующих в условиях Белорусского металлургического завода, в [23] исследована работа методических печей толкательного типа стана 600 Алчевского металлургического комбината. С использованием разработанных математических моделей осуществлен численный эксперимент в широком диапазоне технологических, геометрических и теплофизических параметров. Итогом проведенных исследований явилась разработка инженерного метода расчета нагрева металла, базирующегося на использовании специальных номограмм (для различных марок сталей, с учетом шага раскладки заготовок, производительности печи и др.) Разработанный комплекс вычислительных программ позволяет детально исследовать тепловую работу

нагревательных печных установок с целью усовершенствования действующих и разработки энергосберегающих теплотехнологических режимов.

Наряду с разработкой сопряженных математических моделей значительное внимание уделялось вопросам детального изучения внутреннего теплообмена при нагреве стальных заготовок в методических печах. Например, для вычисления температур, напряжений и деформаций в стальной пластине (для печей толкательного типа) использованы численные методы решения [24, 25] и приближенные аналитические методы (см. [3, 26–28]).

Модель нагрева металла в печах толкательного типа может быть сформулирована:

$$c(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (19)$$

$$T|_{\tau=0} = T_0, \quad (20)$$

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = q_{\text{л}}^{\text{мет.верх}} + q_{\text{к}}^{\text{мет.верх}}, \quad (21)$$

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} = q_{\text{л}}^{\text{мет.низ}} + q_{\text{к}}^{\text{мет.низ}}, \quad (22)$$

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = q_{\text{л}}^{\text{св.верх}} + q_{\text{к}}^{\text{св.низ}}, \quad (23)$$

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} = q_{\text{л}}^{\text{св.низ}} + q_{\text{к}}^{\text{св.низ}}, \quad (24)$$

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = q_{\text{л}}^{\text{том.верх}} + q_{\text{к}}^{\text{том.верх}}, \quad (25)$$

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} = q_{\text{л}}^{\text{том.низ}} + q_{\text{к}}^{\text{том.низ}}, \quad (26)$$

где индексы "мет", "св", "том" соответствуют методической, сварочной и томильной зонам; "верх" и "низ" — верху и низу зоны; "л" и "к" — лучистому и конвективному тепловым потокам.

Граничные условия для любой из технологических зон печи:

$$q_{\text{л}}^{\text{верх}} + q_{\text{к}}^{\text{верх}} = \sigma_{\text{кл,м}}^{\text{верх}} \left(\left(\frac{T_{\text{кл}}^{\text{верх}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{м}}^{\text{верх}}}{100} \right)^4 \right) + \sigma_{\text{г,м}}^{\text{верх}} \left(\left(\frac{T_{\text{г}}^{\text{верх}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{м}}^{\text{верх}}}{100} \right)^4 \right) + \alpha^{\text{верх}} (T_{\text{г}}^{\text{верх}} - T_{\text{м}}^{\text{верх}}), \quad (27)$$

$$q_{\text{л}}^{\text{низ}} + q_{\text{к}}^{\text{низ}} = \sigma_{\text{кл,м}}^{\text{низ}} \left(\left(\frac{T_{\text{кл}}^{\text{низ}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{м}}^{\text{низ}}}{100} \right)^4 \right) + \sigma_{\text{г,м}}^{\text{низ}} \left(\left(\frac{T_{\text{г}}^{\text{низ}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{м}}^{\text{низ}}}{100} \right)^4 \right) + \alpha^{\text{низ}} (T_{\text{г}}^{\text{низ}} - T_{\text{м}}^{\text{низ}}), \quad (28)$$

где индексы "кл", "м", "г" означают кладку, металл и газ.

Так как целью исследования тепловых процессов являлось снижение топливотребления и увеличение выхода годного, математическая модель нагрева металла дополнена уравнениями теплового баланса, уравнением для вычисления толщины окалины и системой уравнений для определения упруго-пластических напряжений:

$$\left(B_i^{\text{в}} (Q_{\text{н}}^{\text{в}} + Q_{\text{ф}}) + \sum_{\kappa=1}^{N-1} B_{\kappa}^{\text{в}} V_{\alpha} c_{\Gamma}^{\text{в}} T_{i-1,i}^{\text{в}} \right) \Delta \tau_i = \sum_{\kappa=1}^i B_{\kappa}^{\text{в}} V_{\alpha} c_{\Gamma}^{\text{в}} T_{i,i+1} \Delta \tau_i + F_{\text{м}} \int_{\Delta \tau_i}^{\Delta \tau_i} (q_{\text{м}}^{\text{вл}} + q_{\text{м}}^{\text{вк}}) + \omega (q_{\text{кл}}^{\text{вл}} + q_{\text{кл}}^{\text{вк}}) dt, \quad (29)$$

$$\left(B_i^{\text{н}} (Q_{\text{н}}^{\text{н}} + Q_{\text{ф}}) + \sum_{\kappa=1}^{i-1} B_{\kappa}^{\text{н}} V_{\alpha} c_{\Gamma}^{\text{н}} T_{i-1,i}^{\text{н}} \right) \Delta \tau_i + Q_{\text{экс}i} = \sum_{\kappa=1}^i B_{\kappa}^{\text{н}} V_{\alpha} c_{\Gamma}^{\text{н}} T_{i,i+1} \Delta \tau_i + k F_{\text{м}} \int_{\Delta \tau_i}^{\Delta \tau_i} (q_{\text{м}}^{\text{нл}} + q_{\text{м}}^{\text{нк}}) + \omega (q_{\text{кл}}^{\text{нл}} + q_{\text{кл}}^{\text{нк}}) dt, \quad (30)$$

$$S \frac{dS}{dt} = 0,5 (\exp(-10125/T_{\text{п}} + 7,25))^2, \quad (31)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} &= 0; \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \\ \frac{\partial^2 \varepsilon_{ik}}{\partial x_j \partial x_i} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{jl}}{\partial x_i \partial x_k} &= \frac{\partial^2 \varepsilon_{il}}{\partial x_j \partial x_k} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{jk}}{\partial x_i \partial x_l}, \\ \sigma_{ij} &= \frac{E}{1+\nu} \left(\varepsilon_{ij} + \frac{\nu}{1-\nu} \varepsilon_{kk} \delta_{ij} - \frac{1+\nu}{1-\nu} \alpha T \delta_{ij} \right), \\ x_i &= \sigma_{ij} n_j; i, j, k, l = 1, 2, 3. \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

После параметрической настройки приведенной математической модели по результатам промышленных экспериментов проведены серии численных расчетов с широким диапазоном изменения технологических, конструктивных и энергетических параметров нагрева металла, на основании которых разработаны рациональные режимы нагрева.

Наряду с численными методами разрабатывались и широко использовались приближенные методы исследования на основе теплового пограничного слоя. Для изучения процессов внутреннего теплообмена при нагреве слитков и заготовок использован метод эквивалентных источников, который эффективно ввели в практику расчетов печей представители украинской и белорусской научных школ металлургической теплофизики и теплоэнергетики [26–29].

Расчетные выражения для определения температурных полей для случая несимметричного нагрева блюмов излучением и конвекцией имеют вид [27].

Инерционный этап:

температура поверхности:

$$\theta_{n2} = \theta_0 + (1 - \theta_0) \frac{Bi_2 + Sk_2(1 + \theta_0)(1 + \theta_0^2)}{2 + Bi_2 + Sk_2(1 + \theta_0)(1 + \theta_0^2)\sqrt{6Fo}}, \quad (33)$$

время протекания инерционного этапа:

$$Fo_0 = \frac{1}{6}(1 - l_1^0), \quad (34)$$

температура по сечению:

$$\theta_j(\xi_j, Fo) = \frac{1}{\varepsilon_\lambda} \left\{ \sqrt{(1 + \varepsilon_\lambda \theta_0)^2 + [(1 + \varepsilon_\lambda \theta_{nj})^2 - (1 + \varepsilon_\lambda \theta_0)^2] \left(1 - \frac{\xi_j}{l_j}\right)^2} - 1 \right\} \quad (35)$$

Регулярный этап нагрева:

$$\begin{aligned} \theta(\xi, Fo) &= \frac{1}{\varepsilon_\lambda} \left\{ \sqrt{(1 + \varepsilon_\lambda \theta_{n1})^2 + \varepsilon_\lambda \frac{Bi_2(1 - \theta_{n1})}{1 + \frac{Bi_2}{2(1 + \varepsilon_\lambda \theta_{n1})}} \xi^2} + \right. \\ &\left. + \varepsilon_\lambda \left[\frac{1 + \frac{Bi_2}{1 + \varepsilon_\lambda \theta_{n1}} \xi^2 - 2\xi \left[Sk(1 - \theta_{n1}^4) + Bi_1(1 - \theta_{n1}) \right] - 1}{1 + \frac{Bi_2}{2(1 + \varepsilon_\lambda \theta_{n1})}} \right] \right\} \quad (36) \end{aligned}$$

Температуру поверхностей $\theta_{n1}(Fo)$ и $\theta_{n2}(Fo)$ определяем исходя из принципа суперпозиции. Для этого используем решения задач одностороннего нагрева пластины с тепловой изоляцией на противоположной стороне.

При одностороннем радиационно-конвективном нагреве температура поверхности рассчитывается по трансцендентному выражению:

$$\Omega(\bar{\theta}_{n1}) - \Omega(\bar{\theta}_{n1}^0) = (Sk_1 + Bi_1)(Fo - Fo_0), \quad (37)$$

где $\Omega(\bar{\theta}_{n1}) = \sum_{i=1}^4 a_i \varphi_i(\bar{\theta}_{n1})$; a_i, φ_i — табулированные коэффициенты.

Температуру противоположной (теплоизолированной) поверхности по известной $\bar{\theta}_{n1}(Fo)$ определяем по формуле:

$$\bar{\theta}_{u1}(Fo) = \frac{1}{\varepsilon_\lambda} \left\{ \sqrt{1 + \varepsilon_\lambda \bar{\theta}_{n1}(Fo) - \varepsilon_\lambda \{Sk_1[1 - \bar{\theta}_{n1}^4(Fo)] + Bi_1[1 - \bar{\theta}_{n1}(Fo)]\}} - 1 \right\}. \quad (38)$$

Нижнюю температуру поверхности при одностороннем нагреве ($\varepsilon_\lambda = 0$) вычисляем следующим образом:

$$\bar{\theta}_{n2}(Fo) = 1 - (1 - \theta_0) \frac{2}{2 + Bi_2 + Sk_2(1 + \bar{\theta}_{n2}^0)(1 + (\bar{\theta}_{n2}^0)^2)} \times \exp \left[- \frac{3(Bi_2 + Sk_2(1 + \bar{\theta}_{n2}^0)(1 + (\bar{\theta}_{n2}^0)^2))}{3 + Bi_2 + Sk_2(1 + \bar{\theta}_{n2}^0)(1 + (\bar{\theta}_{n2}^0)^2)} (Fo - Fo_0) \right]. \quad (39)$$

Температура противоположной стороны рассчитывается так:

$$\bar{\theta}_{u2}(Fo) = \frac{1}{\varepsilon_\lambda} \left(\sqrt{[1 + \varepsilon_\lambda \bar{\theta}_{n2}(Fo)]^2 - \varepsilon_\lambda (Bi_2 + Sk_2(1 + \bar{\theta}_{n2})(1 + \bar{\theta}_{u2}^2))} [1 - \bar{\theta}_{n2}(\tau)] - 1 \right). \quad (40)$$

Имея частные решения (34)–(37) при одностороннем нагреве, температуры поверхности при двустороннем несимметричном нагреве будем определять следующим образом:

$$\theta_{n1}(Fo) = \bar{\theta}_{n1}(Fo) + \bar{\theta}_{u2}(Fo), \quad (41)$$

$$\theta_{n2}(Fo) = \bar{\theta}_{n2}(Fo) + \bar{\theta}_{u1}(Fo). \quad (42)$$

С использованием приведенных математических моделей (19)–(31) и (32)–(42), а также приближенных методик расчета нагрева металла разработаны рациональные режимы нагрева, внедрение которых позволило для условий нагревательных печей стана 810 Новосибирского металлургического завода увеличить выход годного на 60%, снизить удельный расход условного топлива на 3,2 кг у.т/т [31]; для условий методических печей трубозаготовочного стана ДМК снизить удельный расход топлива на 7–12 кг у.т/т и окалинообразование на 10–12% [30].

Исследованию закономерностей тепловой обработки цилиндрических заготовок и осей в кольцевых печах, и в частности для условий оцепрокатного производства ДМК, посвящен ряд работ, например, [32–41]. В основополагающей работе [32] рассмотрены экспериментальные результаты исследования кольцевых печей, показаны основные приемы математического моделирования тепловых процессов, приведены результаты детального исследования процессов внешнего и внутреннего теплообмена. В соответствии с проведенными ранее экспериментальными исследованиями, выполненными в условиях кольцевых печей оцепрокатного стана 250 ДМК, авторами сформулированы математические модели для случая трех-, двухмерного и осесимметричного нагрева цилиндрических заготовок в кольцевой печи.

Задача внутреннего теплообмена для трехмерного "короткого" цилиндра (0,29–0,30×0,89 м) имеет вид

$$c(T)\rho(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \left(\frac{\partial}{\partial r} \lambda(T)r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (43)$$

$$T = T(r; \varphi; z; \tau);$$

$$\left. \begin{aligned} 0 < r < R; 0 \leq \varphi \leq \pi, \\ 0 \leq z \leq h; \tau \leq 0 \end{aligned} \right\}$$

с начальным

$$T_0 = T(r; \varphi; z; 0) \quad (44)$$

и граничными условиями

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = \alpha_\Sigma(\varphi)(T_c - T), \quad (45)$$

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=H} = \alpha_\Sigma(T_c - T). \quad (46)$$

Здесь $T_c = T_c(\tau)$ — текущая температура среды (печи); r, φ, z — соответственно текущие значения радиуса, угла, продольного размера; $\rho(T), c(T), \lambda(T)$ — плотность, теплоемкость и теплопроводность материала цилиндра;

$$\alpha_\Sigma = \alpha_n + \alpha_k, \quad (47)$$

где $\alpha_{\text{л}} = \sigma_{\text{в}}(\varphi)(T_{\text{с}}^2 + T_{\text{м}}^2)(T_{\text{с}} + T_{\text{м}})$; $\sigma_{\text{в}}(\varphi) = \sigma_{\text{вmax}} \sum_{i=0}^6 a_i \cos i\Delta\varphi$.

Для случая несимметричного нагрева неограниченных цилиндров (0,23×1,75—2,0; 0,27×1,75—2,0) исходная модель упрощается и записывается, как для двухмерного и осесимметричного нагрева. Отмеченные математические модели, дополненные уравнением теплового баланса и уравнением для определения величины окаины (29)—(31), решены численным методом по неявной конечно-разностной локально-одномерной схеме. В дальнейшем разработанные математические модели использованы для разработки рациональных режимов нагрева цилиндрических заготовок в кольцевой печи осепрокатного стана 250 ДМК. Предварительно с помощью экспериментальных данных установлены закономерности изменения коэффициента теплообмена α между печной средой и поверхностью заготовки по длине печи при длительной ее эксплуатации (в случае деформированной подины) и распределение его по окружности заготовки [32—35]:

в верхних относительно пода точках заготовки

$$\alpha_{\Sigma}^{\text{в}} = 97,74 - 123,4l + 2378l^2 - 1435,6l^3 - 110,1l^4;$$

в нижних, касающихся пода, точках заготовки

$$\alpha_{\Sigma}^{\text{н}} = 44,69 + 21,39l - 47,04l^2 + 268,2l^3 - 112,4l^4;$$

по окружности заготовки

$$\alpha_{\Sigma} = a \cos \varphi + k,$$

где l — относительная длина печи; $k = (\alpha_{\Sigma}^{\text{в}} + \alpha_{\Sigma}^{\text{н}})/2$; $a = k - \alpha_{\Sigma}^{\text{н}}$; $\alpha_{\Sigma}^{\text{н}} < \alpha_{\Sigma}^{\text{в}}$.

На основании анализа результатов расчетов, базирующихся на использовании описанных выше математических моделей и приближенных методик, разработан рациональный режим нагрева цилиндрических осевых заготовок, внедрение которого в условиях кольцевых печей стана 250 ДМК позволило снизить удельный расход условного топлива на 6,3 кг у.т./т, уменьшить окаинообразование, увеличить производительность на 7,7%, повысить механические свойства готовой металлопродукции.

Наряду с разработками, направленными на энергосберегающие технологии, проводили исследования по улучшению качества нагрева цилиндрических заготовок. Для этого были разработаны методики расчета упруго-пластических напряжений, возникающих в нагреваемых цилиндрических заготовках [37—39]. С целью снижения уровня термических напряжений осуществлен анализ влияния процесса кантования на динамику температурного поля цилиндрических заготовок и обоснован выбор месторасположения кантовочных механизмов для условий кольцевых печей стана 250 ДМК [40, 41].

В последнее время возрос интерес к решению задач противоточного теплообмена в металлургических агрегатах. Можно отметить наши совместные исследования [42, 43], в результате которых впервые получено решение задачи нагрева массивных тел излучением. При этом авторами работы [43] использован двухэтапный метод решения задачи нагрева массивной пластины в теоретическом противотоке: на первом этапе для установления основных закономерностей использован численный конечно-разностный метод решения, на втором — на основании полученных результатов разработана упрощенная (инженерная) методика расчета нагрева.

В работе [43] получено аналитическое решение задачи в объединенной постановке:

$$\frac{1}{\xi^m} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\xi^m \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \right) = \frac{\partial \theta}{\partial \tau}, \quad (48)$$

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \right|_{\xi=1} = \text{Sk} [\theta_{\text{г}}^4(\tau) - \theta_{\text{п}}^4(\tau)] \quad \left. \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \right|_{\xi=0} = 0, \quad (49)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \text{Sk} [\theta_{\text{г}}^4(\tau) - \theta_{\text{п}}^4(\tau)] n_m, \quad (50)$$

$$\theta(\xi, 0) = \theta_0 = \theta' = \text{const}, \quad \theta_{\text{г}}(0) = \theta'' = 1, \quad (51)$$

где введены безразмерные величины

$$\theta(\xi, \tau) = \frac{T(\xi, \tau)}{T''}; \quad \theta_{\text{г}}(\tau) = \frac{T_{\text{г}}(\tau)}{T''};$$

$$\xi = \frac{r}{R}; \quad \tau = \text{Fo} = \frac{at}{R^2}; \quad \text{Sk} = \frac{\sigma_{\text{в}} T_{\text{г}}^3 R}{\lambda};$$

$$n = \text{VC} / (V_{\text{г}} C_{\text{г}}); \quad n_m = (1 + m)n.$$

Поставленная задача решена методом эквивалентных источников. Полученное обобщенное аналитическое решение свободно от неопределенных функций типа n_0 , m_0 и обладает достаточной для практики точностью.

Разработанные методики расчета температур, напряжений и деформаций при нагреве металла в печах получили дальнейшее развитие при решении задач оптимального управления процессами нагрева [3, 32, 44–46]. В качестве критериев оптимальности использованы следующие: минимум окалинообразования и обезуглероживания [3, 45, 46]; минимум расхода топлива [3, 45]; технологические ограничения (температурные напряжения) [3, 32] и др. В качестве математического аппарата при решении задач использован метод магистральной асимптотической оптимизации, разработанный в Белорусской государственной политехнической академии. Анализ результатов, полученных с использованием данного метода, подтвердил его эффективность при решении задач оптимизации по сравнению с методом вариационного исчисления и принципом максимума [46].

Следует также отметить совместные исследования, проведенные специалистами Института газа НАН Украины, Белорусской государственной политехнической академии и Белорусского металлургического завода, направленные на изучение энергоэкологических режимов работы нагревательных печей [14, 47, 48], проведенные в условиях действующего оборудования (печи станов 320/150 и 850) БМЗ.

В процессе исследований осуществлены измерения концентраций наиболее токсичных компонентов продуктов сгорания природного газа NO_x , причем были опробованы по два режима на каждой из печей, отличающиеся изменением α по длине печей. Анализ результатов фактических и рассчитанных концентраций NO_x показал сложность сочетания высоких энергетических показателей нагревательных печей БМЗ, эффективного топливоиспользования при их эксплуатации с экологическими ограничениями.

Заключение

На протяжении последних 10 лет, в частности после распада СССР, совместные научные исследования специалистов-металлургов Украины, Беларуси и России тем не менее активно развиваются, что и подтверждено содержанием настоящей статьи. Следует отметить, что в рамках данного аналитического обзора приведены не все публикации. Авторы отметили лишь наиболее существенные, фундаментальные работы, опубликованные в ведущих изданиях, большая часть которых переведена за рубежом.

Плодотворное сотрудничество между украинскими и белорусскими научными школами при значительной поддержке руководителей промышленного комплекса Украины и Беларуси всех рангов позволило и позволяет сегодня развивать, расширять и укрупнять научные исследования, привлекая к разработке ведущих специалистов обоих государств в области металлургических технологий и ресурсосбережения. Последнее обстоятельство является важнейшей ступенью в области интеграции научных идей, новых технических решений с последующим их эффективным использованием на ведущих металлургических предприятиях Украины и Беларуси.

У такого творческого научного союза ученых Украины, Беларуси и России большие перспективы по крайней мере на ближайшие 10 лет третьего тысячелетия.

Литература

1. Тимошпольский В. И., Гурвич Э. А., Голубченко А. К. и др. Тепловое состояние слитка из среднеуглеродистой стали при его затвердевании и охлаждении // Металлургическая и горнорудная промышленность. 1987. № 3.
2. Голубченко А. К., Тимошпольский В. И., Бродский С. С., Трусова И. А. Режим затвердевания и охлаждения слитка спокойной стали в условиях Днепровского металлургического комбината // Металлургия и литейное производство. Мн.: Беларуская навука, 1998.
3. Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Несенчук А. П., Бродский С. С., Дубина О. В. и др. Промышленные теплотехнологии: Моделирование нелинейных процессов / Под ред. В. И. Тимошпольского и А. П. Несенчука. Мн.: Выш. шк., 2000.
4. Самойлович Ю. А., Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Филиппов В. В. Стальной слиток. В 3 т. Т. 2. Затвердевание и охлаждение / Под ред. В. И. Тимошпольского и Ю. А. Самойловича. Мн.: Беларуская навука, 2000.
5. Тимошпольский И. С., Тимошпольский В. И., Шендрик Б. Ф. и др. // Закономерности нагрева слитков горячего посада // Сталь. 1989. № 9.
6. Тимошпольский В. И., Беляев Н. М., Рядно А. А. и др. Прикладные задачи металлургической теплофизики. Мн.: Навука і тэхніка. 1991.
7. Голубченко А. К., Тимошпольский В. И., Бродский С. С. и др. Тепловой режим слитка на участке разлива — охлаждение — нагрев (совмещенный процесс моделирования) // Металлургия и литейное производство. Мн.: Беларуская навука, 1998.
8. Анисимов Л. А., Тимошпольский В. И., Трусова И. А. и др. Совершенствование режимов нагрева слитков в регенеративных колодцах блюминга 1150 // Сталь. 1999. № 7.
9. Способ нагрева слитков в колодцах / В. И. Тимошпольский, Ю. А. Самойлович, И. С. Тимошпольский и др.: А.с. 1381179 СССР.
10. Бродский С. С. Новые технологические процессы и оборудование многоручьевых сортовых МНЛЗ. Мн.: Беларуская навука, 1998.
11. Timoshpolsky V., Feoctistov Yu., Terleyev A. et al. Operating Experience with VOEST-ALPINE Steelmaking Facility at Byelorussian Metallurgical Plant // Proceedings of the 6th International Continuous Casting Conference. 1993. Linz, Austria.
12. Filippov V.V., Dzyachenka Y.V., Timoshpolsky V.I. et al. Tyre Cord Production Up to 0,9% Carbon at Byelorussian Steel Works // VAI's 8th Continuous Casting Conference. 2000. Linz, Austria.
13. Филиппов В. В., Фоменко А. П., Тимошпольский В. И. и др. Освоение ряда марок сталей для промышленного комплекса на машинах непрерывного литья заготовок Белорусского металлургического завода // Литье и металлургия. 1999. № 4.

14. Тимошпольский В. И. Теплотехнологические основы металлургических процессов и агрегатов высшего технического уровня. Мн.: Наука і тэхніка, 1995.
15. Анисимов Л. А., Бродский С. С., Тимошпольский В. И., Пикус М. И. Исследования процессов затвердевания и охлаждения непрерывнолитых заготовок на сортовых МНЛЗ // *Литье и металлургия*. 1998. № 3.
16. Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Бродский С. С., Пикус М. И. Освоение технологических режимов разлива стали на сортовых МНЛЗ ДМК им. Дзержинского // *Литье и металлургия*. 1999. № 2.
17. Ольшанский В. М., Тимошпольский В. И., Коваль Н. П., Трусова И. А., Филиппов В. В. Расчеты температурных полей и термических напряжений в растущей корочке при разливе стали на сортовых МНЛЗ // *Литье и металлургия*. 2000. № 1.
18. Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Бродский С. С., Дубина О. В. Аналитические способы расчетов процесса затвердевания слитков и заготовок // *Литье и металлургия*. 1999. № 4.
19. Постольник Ю. С., Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Дубина О. В. Тепловые процессы при затвердевании крупных стальных слитков // *Литье и металлургия*. 2000. № 1.
20. Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Вайс Р. Б., Кабишов С. М. Расчет процессов сопряженного теплообмена в нагревательных печах современной конструкции // 1-я Российская нац. конф. по теплообмену. М., 1994. Т. IX.
21. Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Баштовой В. Г., Вайс Р. Б. Расчеты сложного теплообмена в методических печах высшего технического уровня. Тр. III Минского междунар. форума: Теплообмен ММФ-96. Мн., 1996. Т. II.
22. Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Петух П. П. и др. Исследование технологии нагрева непрерывнолитых заготовок высокоуглеродистых сталей в печах с шагающими балками // *Сталь*. 1995. № 4.
23. Тимошпольский В. И., Завелион В. И., Трусова И. А. и др. Задача сопряженного нагрева стального блюма в многозонной методической печи толкательного типа стана 600 // *Литье и металлургия*. 2000. № 4.
24. Тимошпольский В. И., Анисимов Л. А., Несвет В. В. и др. Технология нагрева заготовок в методических печах трубозаготовочного стана Днепровского металлургического комбината им. Ф. Э. Дзержинского // *Металл и литье Украины*. 1999. № 3—4.
25. Тимошпольский В. И., Бродский С. С., Тимошпольский И. С., Сичевой А. П. и др. Технология нагрева специальных марок сталей и сплавов // Сб. науч. тр. гос. металлург. акад. Украины: Металлургическая теплотехника. Днепропетровск, 1999.
26. Постольник Ю. С., Тимошпольский В. И. Радиационно-конвективный нагрев неограниченного цилиндра с функционально-зависящими теплофизическими характеристиками // *Изв. вузов. Энергетика*. 1980. №3.
27. Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Цкитишвили Э. О. и др. Расчетные и экспериментальные исследования технологии нагрева стальных заготовок в методических печах толкательного типа // *Литье и металлургия*. 2000. № 1.
28. Губинский В. И., Тимошпольский В. И., Трусова И. А. и др. Расчет температур, деформаций и напряжений при нагреве массивных пластин // Сб. науч. тр. Национальной металлург. акад. Украины: Металлургическая теплотехника. Днепропетровск, 2000. Т. 3.
29. Постольник Ю. С., Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Бродский С. С. Совершенствование технологии нагрева на основе нелинейного математического моделирования процессов теплопроводности // Юбил. сб. науч. тр.: 80 років ДДТУ. Днепропетровск, 2000.
30. Тимошпольский В. И. Разработка режимов нагрева стали в методических и кольцевых печах с использованием математических моделей // *Сталь*. 1999. № 7.
31. Анисович Г. А., Тимошпольский В. И., Трусова И. А. и др. Идентификация математических моделей при нагреве специальных марок сталей в печах // *Литье и металлургия*. 2000. № 1.
32. Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Пекарский М. Я. Кольцевые печи (Теория и расчеты) / Под общ. ред. В. И. Тимошпольского. Мн.: Выш. шк., 1993.
33. Тимошпольский В. И., Тимошпольский И. С., Виниченко В. П. и др. Экономичные режимы работы кольцевых печей осепрокатного стана 250 // *Сталь*. 1989. №2.
34. Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Тимошпольский И. С. и др. Разработка и внедрение ресурсосберегающих теплотехнологий производства осевых заготовок на Днепровском металлургическом комбинате им. Ф. Э. Дзержинского // *Литье и металлургия*. 1998. № 3.
35. Анисимов Л. А., Тимошпольский В. И., Сичевой А. П. и др. Разработка экономичных теплотехнических параметров нагревательных печей осепрокатного стана 250 // *Металл и литье Украины*. 1999. № 3—4.
36. Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Сичевой А. П. и др. Усовершенствование технологии термической обработки катаных осей железнодорожного транспорта // *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1987. №8.
37. Губинский В. И., Тимошпольский В. И., Дубина О. В. и др. Расчет температурных полей и термонапряжений в цилиндрической заготовке при осесимметричном нагреве // *Литье и металлургия*. 2000. № 4.
38. Постольник Ю. С., Тимошпольский В. И., Трусова И. А. Термомеханика вагонных осей в процессе их изготовления // Тез. докл. X Междунар. конф. "Проблемы механики железнодорожного транспорта". Днепропетровск, 2000.
39. Постольник Ю. С., Ковба Н. М., Тимошпольский В. И., Трусова И. А. Упруго-пластические напряжения в симметрично нагреваемом цилиндре с переменными свойствами // *Вестн. СевГТУ: Сб. науч. тр. Севастополь*, 2000. Вып. 23.
40. Бродский С. С., Тимошпольский В. И., Трусова И. А. и др. Исследование кантования цилиндрических заготовок в кольцевых печах // Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф.: Литейное производство и металлургия. Новые технологии и материалы. Мн., 1999.
41. Тимошпольский В. И., Трусова И. А., Козлов С. М., Дубина О. В. Обеспечение равномерности прогрета цилиндрических слитков посредством кантования при нагреве металла в кольцевых печах // Сб. науч. тр. Национальной металлургической академии Украины: Металлургическая теплотехника. Днепропетровск, 2000. Т. 3.
42. Самойлович Ю. А., Кавадеров А. В., Тимошпольский В. И. и др. Закономерности нагрева массивных тел излучением в теоретическом противотоке // *Литье и металлургия*. 2000. № 4.
43. Постольник Ю. С., Огурцов А. П., Тимошпольский В. И., Трусова И. А. Математическая модель нагрева массивных тел в теоретическом противотоке // Математичне моделювання. Днепропетровський державний технічний університет. Днепропетровск, 2000.
44. Тимошпольский В. И., Козлов С. М., Ковалевский В. Б. и др. Основные методы оптимизации режимов нагрева металла // *Литье и металлургия*. 2000. № 3.
45. Тимошпольский В. И., Козлов С. М., Ковалевский В. Б. и др. Решение задач управления нагревом металла на основе метода магистральной асимптотической оптимизации // *Литье и металлургия*. 2000. № 4.
46. Тимошпольский В. И., Ковалевский В. Б., Ольшанский В. М. и др. Выбор температурного режима нагрева металла по минимуму окисления на основе метода магистральной оптимизации // *ИФЖ*. 2000. Т. 73, № 6.
47. Сорока Б. С., Тимошпольский В. И., Трусова И. А. и др. Энергоэкологический анализ работы режимов нагревательных печей // *Изв. вузов. Энергетика*. 1992. № 2.
48. Сорока Б. С., Валь Л. И., Трусова И. А. и др. Энергоэкологические испытания печей с шагающими балками // *Сталь*. 1991. № 7.