УДК 669.27:519

# КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР НА ПОВЕРХНОСТИ ВЫТЯГИВАЕМОГО СЛИТКА ПРИ ДИСКРЕТНОМ ХАРАКТЕРЕ ЗОН ВТОРИЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

**Докт. физ.-мат. наук, проф. ЧИЧКО А. Н., канд. техн. наук АНДРИАНОВ Н. В., инж. ДЕМИН А. В.**

*Белорусский национальный технический университет*

Одним из важнейших в теории кристаллизации слитков является вопрос о характере изменения температурного поля в области перехода жидкотвердого слитка в зоне вторичного охлаждения [1]. В промышленном процессе непрерывной разливки стали структура зон вторичного охлаждения дискретная по характеру теплоотдачи и состоит из водяной (паровой) рубашки, воздушной прослойки, охлаждаемых и неохлаждаемых роликов. Это приводит к неоднородному температурному полю в слитке. Анализ литературных данных показывает, что именно здесь происходит формирование основных свойств непрерывно-литой заготовки. В связи с этим научный интерес представляют детальные компьютерные расчеты этой области слитка, тем более, что экспериментально проследить динамику изменения температур в этой области современными приборами практически невозможно.

Цель настоящей работы – компьютерное моделирование трехмерного температурного поля в областях «кристаллизатор – воздух – пар – охлаждаемые ролики – неохлаждаемые ролики» движущегося слитка размером 250×300 мм из различных марок сталей, получаемых в МНЛЗ-3.

Для расчета были использованы математические модели, основанные на уравнении теплопроводности с использованием функции, учитывающей процесс кристаллизации [2]:

$$\frac{\partial T}{\partial \text{ф}} = \frac{1}{c(T)\text{с}}\left( F_x + F_z + Q_{\text{кр}} \frac{\partial \text{с}_{sol}}{\partial \text{ф}} \right), \qquad (1)$$

где

$$F_i = \begin{cases} \dfrac{\partial\left( \text{л}(T) \dfrac{\partial T}{\partial \text{ф}_i} \right)}{\partial \text{ф}_i}, & x,\ y,\ z \in \text{Щ}; \\ \dfrac{\text{л}(\Phi) \dfrac{\partial \Phi}{\partial \text{ф}_i} - k(\Phi - \Phi_{\text{ср}})}{\partial \text{ф}_i}, & x,\ y,\ z \in \text{Щ}_j, \end{cases} \qquad (2)$$

$T$ – температура; τ – время; λ($T$) – коэффициент теплопроводности материала при температуре $T$; $c$($T$) – удельная теплоемкость материала при температуре $T$; $\rho_{sol}$ – плотность твердой фазы; $\rho_{lic}$ – плотность жидкой фазы; $\rho = \rho_{sol} + \rho_{lic} = 8700$ кг/м$^3$ – плотность материала; $x$, $y$, $z$ – декартовы координаты; $i$ – $x$ или $z$; $Q_{кр}$ – удельная теплота кристаллизации металла; $T_{ср}$ – температура охлаждающей среды (зависит от зоны охлаждения, т. е. координаты $y$); $k$ – коэффициент теплоотдачи поверхности металла в охлаждающую среду (зависит от зоны охлаждения, т. е. координаты $y$); $\Omega_i$ – пространство слитка, $\Omega_j$ – то же «слиток – охлаждающая среда».

С учетом расхода воды в различных зонах были установлены следующие коэффициенты теплоотдачи: зона 1 – 1200 Вт/(м$^2$ · К); зона 2 – 464; зона 3 – 232; воздух – 173 Вт/(м$^2$ · К).

Определение $T(\tau)$ из уравнения (1) осуществляли на основе конечно-разностной схемы

$$T(x, y, z, \tau + \Delta\tau) = T(x, y, z, \tau) + \\ + \frac{\Delta\tau}{c(T)\rho}\left( F_X(x, y, z, \tau) + F_Z(x, y, z, \tau) + Q_{\text{кр}} \frac{\Delta\rho_{\text{sol}}(x, y, z, \tau)}{\Delta\tau} \right), \quad (3)$$

где $F_x(x, y, z, \tau)$ – функция, учитывающая процесс кристаллизации [3].

При этом объем моделируемого пространства $(380 \times 330 \times 18000)$ мм был разбит на элементы прямоугольной формы длиной $\Delta X$ = 10 мм, шириной $\Delta Z$ = 10 мм и высотой $\Delta Y$ = 20 мм. Приращение температуры в одном элементе определялось через интервал времени $\Delta\tau$ = 0,08 с.

Процесс образования кристалла представлялся как увеличение плотности твердой фазы и уменьшение плотности жидкой фазы в точках пространства с каждым тактом моделирования:

$$\Delta\rho_{\text{sol}}(x, y, z, \tau) = \rho(x, y, z, \tau)(T_{\text{lis}}(C_{\text{lis}}) - T)c(T) / Q_{\text{кр}} \; ; \quad (4)$$

$$\rho_{\text{sol}}(x, y, z, \tau + \Delta\tau) = \rho_{\text{sol}}(x, y, z, \tau) + \Delta\rho_{\text{sol}}(x, y, z, \tau) \; ; \quad (5)$$

$$\rho_{\text{lic}}(x, y, z, \tau + \Delta\tau) = \rho_{\text{lic}}(x, y, z, \tau) - \Delta\rho_{\text{sol}}(x, y, z, \tau) \, , \quad (6)$$

где $\rho_{\text{sol}}$ – плотность твердой фазы; $\rho_{\text{lic}}$ – плотность жидкой фазы; $\rho = \rho_{\text{sol}} + \rho_{\text{lic}}$ – общая плотность металла; $T_{\text{lic}}(C_{\text{lic}})$ – температура ликвидуса, зависящая от концентрации углерода в жидкой фазе.

Поскольку в процессе разливки стали заготовка перемещается равномерно сверху вниз, такое перемещение моделируется копированием параметров соседних элементов из верхнего в нижний, начиная с самых нижних пар моделируемого пространства. Кроме того, копирование осуществляется через интервал модельного времени, соответствующий скорости разливки. То есть, если скорость разливки равна 0,75 м/мин = 0,0125 м/с, шаг моделируемого пространства равен 0,02 м, а шаг времени для моделирования процесса охлаждения равен 0,08 с, то на один такт перемещения приходится 0,02/(0,08 · 0,0125) = 20 тактов теплового процесса. Уравнения модели были дополнены краевыми условиями с учетом моделируемого технологического процесса.

В качестве марок сталей для расчета были выбраны: 1 – 70К; 2 – 40Х; 3 – 20ХН3А; 4 –2С45. Для перечисленных марок и на основе данных технологического процесса разливки стали на МНЛЗ-3 (схема реализована на РУП «БМЗ») были отобраны для расчета: температуры разливки, их скорость, расходы воды на различных участках зоны вторичного охлаждения, уровень расплавов в кристаллизаторе и характеристики его изменения, а также взяты из экспериментальных данных [5, 6] зависимости теплопроводности, модуля Юнга, модуля сдвига, коэффициента линейного расширения, плотности от температуры, теплоты кристаллизации. В качестве ба-

зовой схемы структуры зоны вторичного охлаждения были приняты данные, представленные на рис. 1. В слитке выделено несколько направлений, в которых, как показали предварительные исследования, наиболее удобно анализировать характер температур. На рис. 1 также представлено изображение одного из продольных сечений рассчитываемой области и положение точек, в которых анализировались изменения температур.

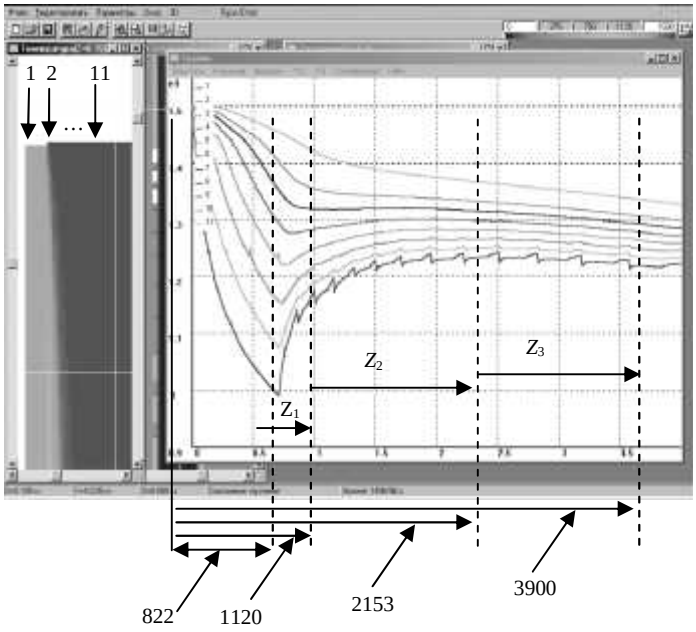


*Рис. 1.* Распределение температур в центральном сечении слитка, проходящем через зоны «кристаллизатор – воздух – ЗВО1 (воздух – охлаждаемые ролики – неохлаждаемые ролики – пар) – ЗВО2 (воздух – охлаждаемые ролики – неохлаждаемые ролики – пар) – ЗВО3 (воздух – охлаждаемые ролики – неохлаждаемые ролики – пар)» с размерами МНЛЗ-3 (сталь 80К, слиток 250×300 мм)

На рис. 2 представлено распределение температур для плоскости $X$ = 0,125 м, для точки, находящейся на расстоянии $Z$ = 0,0025 м от поверхности слитка. Каждой марке стали соответствует свой порядковый номер. Расчеты проведены по длине слитка, соответствующей началу кристаллизатора и концу третьей зоны вторичного охлаждения. В этом интервале находятся кристаллизатор и три зоны вторичного охлаждения. Каждая зона вторичного охлаждения разбита еще на несколько зон, соответствующих паровой рубашке, воздушной прослойке, охлаждаемым и неохлаждаемым роликам. Все положения зон, их размеры соответствовали размерам МНЛЗ-3, используемым на БМЗ. Анализ изменения температур для четырех марок сталей показал (рис. 2), что в зоне кристаллизатора в области от 0 до 0,84 м кривая изменения температуры уменьшается для точки 0,0025 м (положение точки от края слитка), причем для всех четырех марок сталей кривые по форме и количественным значениям температуры накладываются друг на друга. При выходе из кристаллизатора температура увеличивается (рис. 2б) для всех четырех марок сталей. Наиболее значительно она повышается для слитка из стали 40Х, самые низкие значения температуры наблюдаются для слитка из стали 70К. Температуры для слитков

из сталей 20ХН3А и 2С45 имеют промежуточные значения по характеру подъема температуры, соответствующей слиткам из сталей 70К и 40Х.

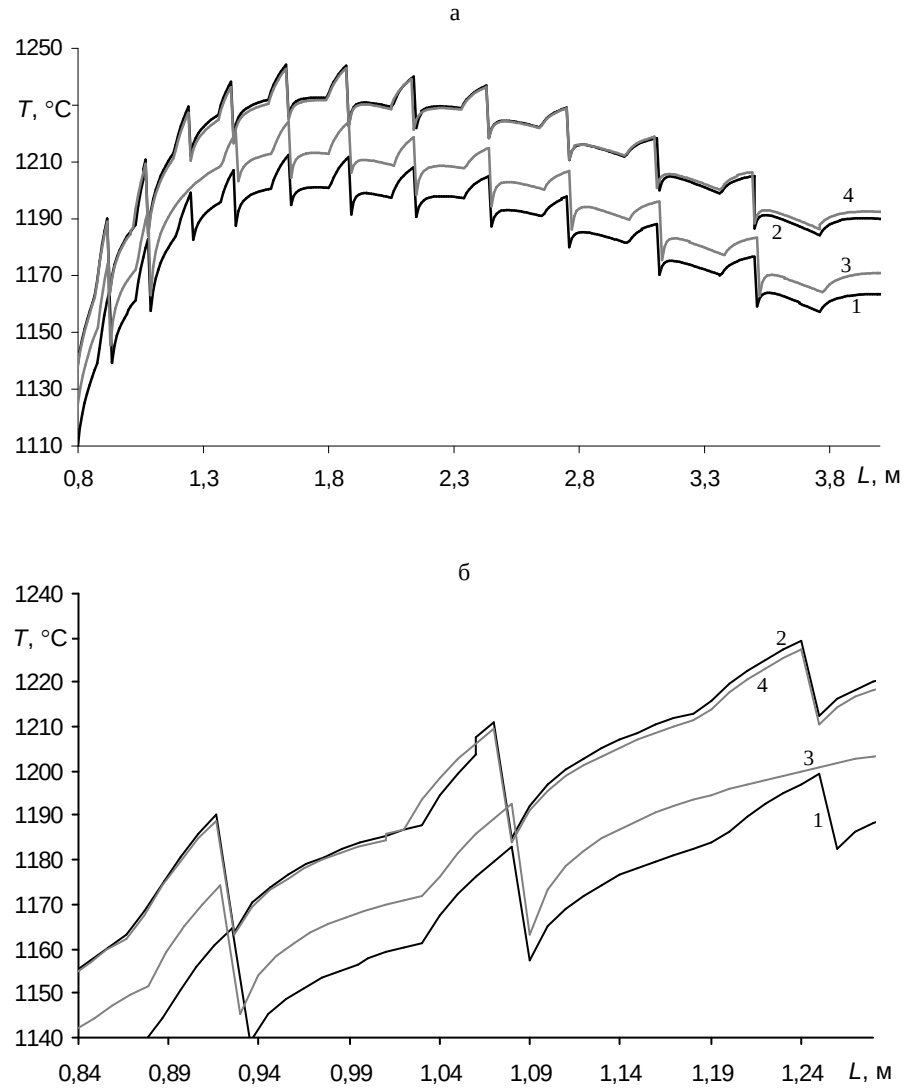


*Рис. 2.* Распределение температур в направлении точки А1 с координатами $X$ = 0,125 м, $Z$ = 0,0025 м вдоль стального слитка: а – в полной зоне охлаждения; б – в зоне охлаждения 1 + воздух (1 – 70К, 2 – 40Х, 3 – 40ХН3А, 4 – 2С45)

При дальнейшем прохождении слитка в интервале 0,84…1,28 м (рис. 3) от начального уровня (в промежуток входит ЗВО-1 + воздух) наблюдается увеличение температуры для всех марок стали без исключения. Наиболее сильно растет температура для слитка из стали 40Х. За счет изменения тепловых свойств охлаждающейся среды, связанной с переходами слитка через воздушную прослойку, водяную рубашку, охлаждаемые и неохлаждаемые ролики наблюдается пилообразный ход кривой температуры. На участках 0,84…0,86; 0,93…1,02; 1,09…1,15 м наиболее высокая температура наблюдается для стали 20ХН3А. На участках 0,84…1,28 м температура для слитка из стали 2С45 выше, чем для слитка из стали 20ХН3А. Это сви-

детельствует о сложном характере температурных напряжений по всей длине слитка для используемых сталей. В зоне вторичного охлаждения 1 на одних участках температурные градиенты для стали 20ХН3А выше, чем температурные градиенты для стали 2С45, на других – наблюдается обратная картина. По-видимому, сложный характер изменения температуры связан с изменением модуля Юнга от температуры для этих сталей.

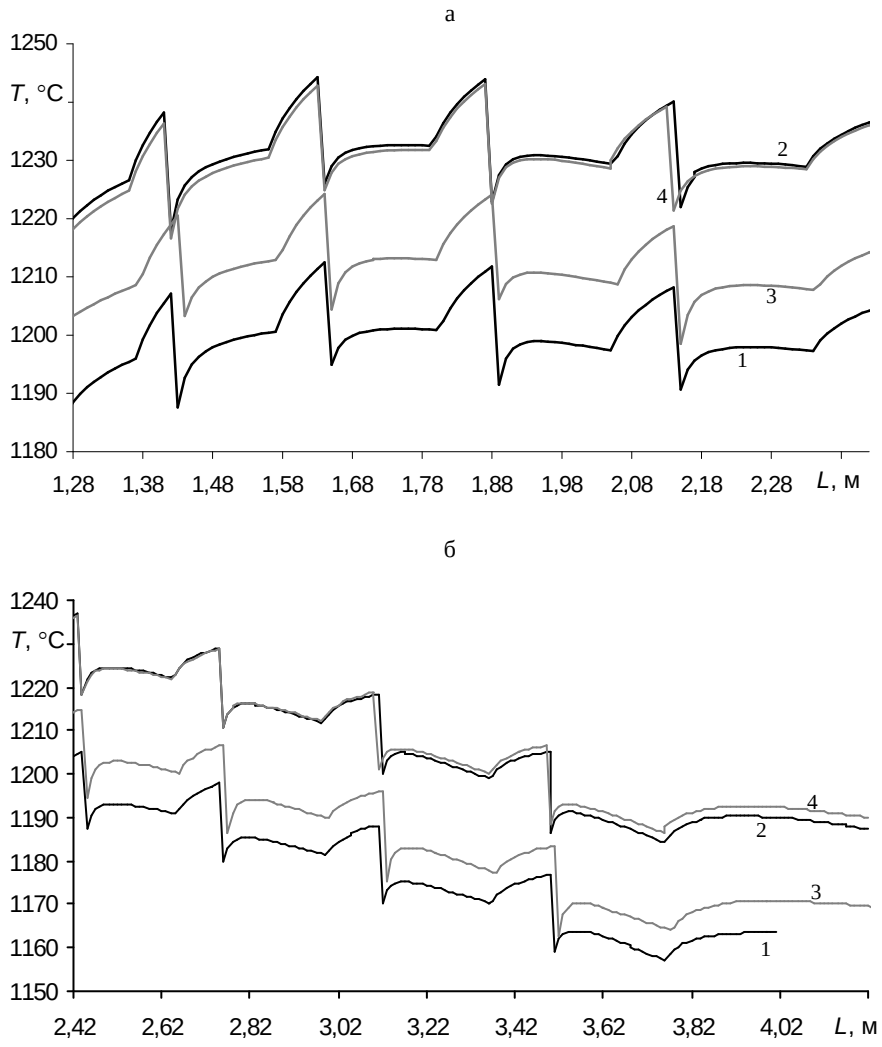


*Рис. 3.* Распределение температур в направлении точки А1 с координатами $X$ = 0,125 м, $Z$ = 0,0025 м вдоль стального слитка: а – в зоне охлаждения 2 + воздух; б – в третьей зоне охлаждения – ЗВО-3 (1 – 70К, 2 – 40Х, 3 – 40ХН3А, 4 – 2С45)

**В Ы В О Д**

На основе выполненных расчетов по исследованию процесса формирования слитка размером 250×300 м из сталей 70К, 40Х, 20ХН3А, 2С45 установлено, что температурные перепады на поверхности слитка при охлаждении возникают вследствие изменения коэффициентов теплоотдачи в зоне вторичного охлаждения за счет различного влияния водяного и воздушного охлаждений, положения охлаждаемых и неохлаждаемых роликов.

Показано, что для базового варианта МНЛЗ-3 в зоне вторичного охлаждения 0…4,3 м наиболее сильно снижается температура слитка из стали 70К. Для стали 40Х наблюдается наибольший подъем температуры в зоне вторичного охлаждения. Температурные градиенты слитка из сталей 20ХН3А, 2С45 изменяются в интервалах, соответствующих слиткам из сталей 40Х и 70К.

ЛИТЕРАТУРА

1. Евтеев Д. П., Колыбалов И. Н. Непрерывное литье стали. – М.: Металлургия, 1984. – 200 с.

2. Чичко А. Н. Компьютерные системы моделирования физических процессов // Вестник БНТУ. – 2003. – № 2. – С. 42–48.

3. Чичко А. Н., Яцкевич Ю. В. Взаимосвязь тепловых параметров и электронного строения атомов твердой фазы в системе расплав алюминия – зародыш 3d-элемента // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 1999. – № 1. – С. 65–69.

4. Компьютерная система «ПроНРС» и трехмерное моделирование распределения температур, напряжений и углерода в процессе непрерывной разливки стали / А. Н. Чичко, Д. М. Кукуй, В. Ф. Соболев и др. // Литье и металлургия. – 2002. – № 3. – С. 21–27.

5. Колосков М. М. Марочник сталей и сплавов. – М.: Машиностроение, 2001. – 671 с.

6. Журавлев В. И., Николаева О. И. Машиностроительные стали. – М.: Машиностроение, 1968. – 332 с.

Представлена кафедрой
машин и технологий
литейного производства

Поступила 8.10.2004

УДК 536.242.08

# ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ЭКОНОМИЧНОСТИ ПАРОТУРБИННЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ПУТЕМ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА

**Канд. техн. наук КЕЛБАЛИЕВ Р. Ф.**

*Азербайджанская государственная нефтяная академия*

Основная часть электроэнергии вырабатывается на тепловых электрических станциях (ТЭС). Известен ряд методов увеличения коэффициента полезного действия и уменьшения удельного расхода топлива на выработку электроэнергии [1…3]. Наряду с этим улучшение энергетических показателей ТЭС можно обеспечить также интенсификацией теплообмена в тепловом оборудовании (в котле, подогревателях высокого и низкого давления, конденсаторе). Теоретическими и экспериментальными исследованиями установлено влияние интенсификации теплообмена на эффективность и экономичность работы паротурбинных электростанций.

Процесс кипения воды, осуществляемый в экранных трубах котла, изучен достаточно хорошо [4…8]. В парогенераторах сверхкритического дав-