

УДК 621.746.5

## РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ И ТЕРМОНАПРЯЖЕНИЙ ЗАГОТОВОК В ХОДЕ НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ

Докт. техн. наук, проф. ТИМОШПОЛЬСКИЙ В. И.,  
канд. техн. наук, проф. ТРУСОВА И. А., канд. техн. наук КОЗЛОВ С. М.,  
канд. техн. наук ФИЛИППОВ В. В., инж. КОВАЛЬ Н. П.

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

Разработка рациональных технологических режимов разливки сталей на сортовых машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) требует проведения исследований теплофизических и термомеханических явлений в затвердевающей заготовке. Исходя из целей и задач научных изысканий и учитывая ряд сопутствующих процессов, влияющих на технологию непрерывной разливки, сложную задачу решения системы сопряженных уравнений можно свести к математическому моделированию температурных полей и термических напряжений по сечению непрерывнолитой заготовки. Подобные упрощения возможны благодаря выполненным промышленным экспериментам [1—3].

Тепловые процессы, происходящие в кристаллизующемся слитке, описывает дифференциальное уравнение теплопроводности

$$\rho_{\text{эф}} c_{\text{эф}} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda_{\text{эф}} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad (1)$$

где  $\tau$  — время;  $c_{\text{эф}}$  — эффективная теплоемкость, равная в жидкой фазе теплоемкости расплава  $c_{\text{ж}}$ , в твердой — теплоемкости затвердевшей стали  $c_{\text{т}}$  и в двухфазной зоне —  $c_{\text{д}}$ ,

$$c_{\text{д}}(T) = c_{\text{т}} \varphi + c_{\text{ж}} (1 - \varphi) + q_{\text{кр}} \frac{\partial \varphi}{\partial T};$$

$\varphi = \frac{T_L - T}{T_L - T_S}$  — доля твердой фазы в двухфазной зоне;  $T$  — текущая

температура;  $T_L$  — температура ликвидуса;  $T_S$  — температура солидуса;  $q_{\text{кр}}$  — скрытая теплота кристаллизации;  $\lambda_{\text{эф}}$  — эффективная теплопроводность, равная в жидкой фазе теплопроводности расплава  $\lambda_{\text{ж}}$ , в твердой — теплопроводности затвердевшей стали  $\lambda_{\text{т}}$  и в двухфазной зоне —  $\lambda_{\text{д}}$ ,

$$\lambda_d = \lambda_t \varphi + \lambda_j (1 - \varphi);$$

$\rho_{эф}$  — эффективная плотность, равная в жидкой фазе плотности расплава  $\rho_j$ , в твердой — плотности затвердевшей стали  $\rho_t$  и в двухфазной —  $\rho_d$ ,

$$\rho_d = \rho_t \varphi + \rho_j (1 - \varphi).$$

Приняв постоянной температуру внутренней поверхности кристаллизатора, получим граничные условия в следующем виде: на осях симметрии —

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} = 0; \quad (2)$$

на охлаждаемых поверхностях —

$$-\lambda_{эф} \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=s} = -\lambda_{эф} \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=s} = \alpha(T) (T_{пов} - T_{кр}), \quad (3)$$

где  $x, y$  — текущие координаты;  $T_{пов}$  — температура на поверхности заготовки;  $T_{кр}$  — температура внутренней стенки кристаллизатора;  $\alpha(T)$  — коэффициент теплоотдачи от заготовки к кристаллизатору.

Уравнения (1)—(3) дополняются начальным условием

$$T(x, y, 0) = T_0, \quad (4)$$

где  $T_0$  — температура заливки металла.

Численное решение задачи внутренней теплопроводности осуществлялось методом конечных разностей с применением явной разностной схемы.

Задача теплопроводности для затвердевающей заготовки (1)—(4) допускает два варианта решения — прямой и обратный. Прямой вариант предполагает численное решение дифференциального уравнения (1) с граничными (2), (3) и начальным (4) условиями, когда коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  полагается известным. В этом случае осуществляется многовариантный анализ условий затвердевания заготовки при варьировании размеров заготовки, скорости литья и величины  $\alpha$ .

Обратный вариант решения преследует цель определения реального (усредненного) коэффициента теплоотдачи на отдельных участках МНЛЗ с использованием опытных данных по измерению температур в отдельных точках сечения заготовки.

Для определения коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  в системе «заготовка—кристаллизатор» воспользуемся уравнением теплового баланса [4]

$$Q_{физ}^t + Q_{кр} + Q_{пер} + Q_{физ}^{t-j} = Q_{полл},$$

где  $Q_{физ}^t$  — физическая теплота затвердевшей стали;  $Q_{кр}$  — скрытая теплота кристаллизации;  $Q_{пер}$  — физическая теплота перегрева жидкой ста-

ли;  $Q_{\text{физ}}^{\text{T-ж}}$  — физическая теплота двухфазной зоны;  $Q_{\text{погл}}$  — теплота, отводимая от заготовки,

$$Q_{\text{физ}}^{\text{T}} = V_{\text{кр}} \rho_{\text{т}} c_{\text{т}} (T_{\text{S}} - 0,5(T_{\text{S}} + T_{\text{пк}})); \quad Q_{\text{кр}} = V_{\text{кр}} q_{\text{кр}} \rho_{\text{т}};$$

$$Q_{\text{пер}} = V_{\text{кр}} \rho_{\text{ж}} c_{\text{ж}} (T_0 - T_L);$$

$$Q_{\text{физ}}^{\text{T-ж}} = V_{\text{кр}} \rho_{\text{д}} c_{\text{д}} (T_L - T_S); \quad Q_{\text{погл}} = \bar{q}_{\text{погл}} F \tau_{\text{кр}},$$

где  $V_{\text{кр}}$  — объем кристаллизатора;  $T_{\text{пк}}$  — температура поверхности слитка в момент затвердевания его центра;  $\bar{q}_{\text{погл}}$  — средняя плотность теплового потока, необходимая для отвода теплоты из кристаллизатора;  $F$  — теплоотводящая поверхность кристаллизующегося металла;  $\tau_{\text{кр}}$  — время нахождения заготовки в кристаллизаторе.

Задаваясь толщиной затвердевшего слоя  $\xi_{\text{кр}}$  при выходе заготовки из кристаллизатора и временем нахождения ее в кристаллизаторе, определим температуру поверхности  $T_{\text{пк}}^{\text{кр}}$  и перепад температур в твердой корке  $\Delta T_{\text{к}}^{\text{кр}}$ :

$$T_{\text{пк}}^{\text{кр}} = T_S - \frac{6\xi_{\text{кр}}^2 \rho_{\text{т}} q_{\text{кр}}}{12\lambda_{\text{т}} \tau_{\text{эф}} - \rho_{\text{т}} c_{\text{т}} \xi_{\text{кр}}^2}; \quad \Delta T_{\text{к}}^{\text{кр}} = \frac{6\xi_{\text{кр}}^2 \rho_{\text{т}} q_{\text{кр}}}{12\lambda_{\text{т}} \tau_{\text{эф}} - \rho_{\text{т}} c_{\text{т}} \xi_{\text{кр}}^2},$$

где  $\tau_{\text{эф}} = \tau_{\text{кр}} k_{\text{кр}}$  — эффективное время затвердевания заготовки, зависящее от геометрии заготовки;  $k_{\text{кр}}$  — поправочный коэффициент (для сечения заготовки, приближающегося к квадрату,  $k_{\text{кр}} \approx 2$ ).

Из условия стационарности находим конечную плотность теплового потока  $q_{\text{к}}^{\text{кр}}$  и соответствующий ему коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{\text{к}}^{\text{кр}}$ :

$$q_{\text{к}}^{\text{кр}} = \frac{\lambda_{\text{т}} \Delta T_{\text{к}}^{\text{кр}}}{\xi_{\text{кр}}}; \quad \alpha_{\text{к}}^{\text{кр}} = \frac{q_{\text{к}}^{\text{кр}}}{T_{\text{пк}}^{\text{кр}} - T_{\text{кр}}}.$$

Плотность начального теплового потока  $q_0^{\text{кр}}$  определяем из средне-логарифмического усреднения

$$\bar{q}^{\text{кр}} = \frac{q_0^{\text{кр}} - q_{\text{к}}^{\text{кр}}}{\ln \frac{q_0^{\text{кр}}}{q_{\text{к}}^{\text{кр}}}},$$

а начальную температуру поверхности — из условия плотного контакта металла с кристаллизатором

$$T_{\text{п0}}^{\text{кр}} = 0,5(T_0 - T_{\text{кр}}).$$

Тогда коэффициент теплоотдачи для начального момента времени равен

$$\alpha_0^{\text{кр}} = \frac{q_0^{\text{кр}}}{T_{\text{п0}}^{\text{кр}} - T_{\text{кр}}},$$

а средний коэффициент теплоотдачи —

$$\bar{\alpha}^{\text{кр}} = \frac{\bar{q}^{\text{кр}}}{\bar{T}_{\text{пов}}^{\text{кр}} - T_{\text{кр}}},$$

где  $\bar{T}_{\text{пов}}^{\text{кр}} = 0,5(T_{\text{пк}}^{\text{кр}} + T_{\text{п0}}^{\text{кр}})$  — средняя температура поверхности кристаллизующегося слоя.

Время достижения среднего коэффициента теплоотдачи по высоте кристаллизатора рассчитывается по формуле

$$\tilde{\tau}_{\text{кр}} = \tau_{\text{кр}} \left( \frac{q_0^{\text{кр}} - \bar{q}^{\text{кр}}}{q_0^{\text{кр}} - q_{\text{к}}^{\text{кр}}} \right).$$

Для определения коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  в системе «заготовка—зона вторичного охлаждения (ЗВО)» использована зависимость коэффициента теплоотдачи от расхода воды [5]

$$\alpha = \alpha_0 + \eta_{\text{к}}g,$$

где  $\alpha_0$  характеризует интенсивность теплообмена на поверхности заготовки при теплообмене излучением и конвекцией и равно  $\alpha_0 = 140...160$  Вт/м<sup>2</sup>;  $\eta_{\text{к}}$  — эмпирическая константа;  $g$  — расход воды, м<sup>3</sup>/с.

После прохождения слитком ЗВО идет его дальнейшее охлаждение на воздухе. Коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  в этом случае находим по выражению

$$\alpha = \alpha_{\text{конв}} + \alpha_{\text{луч}} = \alpha_{\text{конв}} + \frac{C_0 \epsilon_{\text{м}} \left[ \left( \frac{T_{\text{пов}} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{возд}} + 273}{100} \right)^4 \right]}{T_{\text{пов}} - T_{\text{возд}}},$$

где  $\alpha_{\text{конв}}$ ,  $\alpha_{\text{луч}}$  — коэффициенты теплоотдачи конвекцией и излучением соответственно;  $T_{\text{возд}}$  — температура окружающего воздуха;  $\epsilon_{\text{м}}$  — степень черноты поверхности слитка.

Для нахождения эмпирического коэффициента  $\eta_{\text{к}}$  и идентификации математической модели затвердевания и охлаждения заготовок проведены серии расчетов на ПЭВМ по определению температурного поля. На рис. 1 представлены расчетные и экспериментальные данные для двух точек (1 и 2) в поперечном сечении заготовки сечением 0,250×0,300 м стали 80К. Согласование расчетных и экспериментальных данных следует признать вполне удовлетворительным. На этом же рисунке представлены некоторые результаты решения прямой задачи, в частности изменение во времени температур в центре поперечного сечения заготовки  $t_{\text{ц}}$  и посередине широкой грани на ее поверхности  $t_{\text{пов}}$ .

Полученная в ходе экспериментов и расчетов информация о распределении температур по сечению твердой корки затвердевающей стальной заготовки дает основания для расчетной оценки возникающих в

корке термических напряжений. Используя гипотезу В. А. Пальмова о стабилизированном распределении температуры в растущей корочке, а также эффект релаксации напряжений [6], запишем

$$\sigma = \frac{\beta E (T_s - T_{cp})}{2(1-\nu)} \left( \frac{(1-X)(\varphi + 2X)}{(1+\varphi)(\varphi + X)} \right) - \ln \frac{\varphi + 1}{\varphi + X},$$

где  $\beta$ ,  $E$ ,  $\nu$  — соответственно коэффициент линейного расширения, модуль упругости, коэффициент Пуассона;  $X = x/\xi$  — относительная координата твердой фазы;  $T_s$ ,  $T_{cp}$  — температуры солидуса и окружающей среды (стенки кристаллизатора, охлаждающей воды и воздуха) соответственно;  $\varphi = \lambda/\alpha (\xi + X_0)$ ;  $X_0 = \lambda/\alpha$  — фиктивный слой твердой фазы.

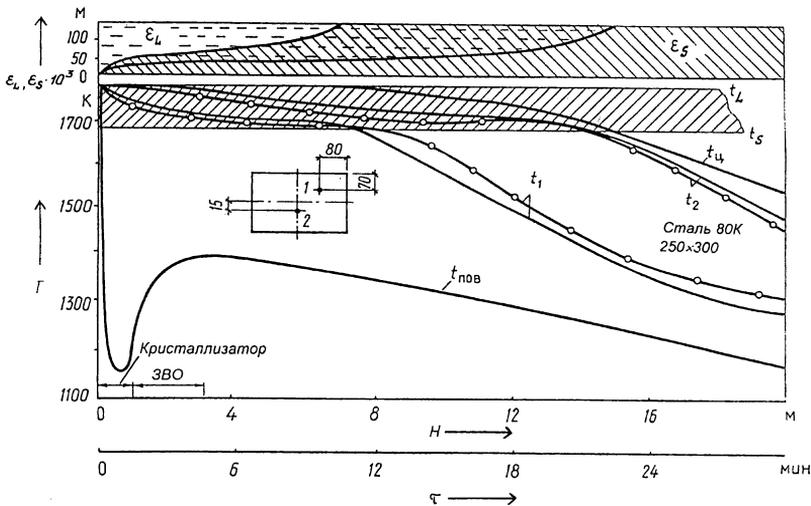


Рис. 1. Изменение температуры в заготовке по опытным (—○—) и расчетным (—) данным в различных точках сечения заготовки и расположение изоликвидуса и изолидуса

С учетом проявления в области высоких температур эффекта релаксации для уточнения значений температурных напряжений используем зависимость

$$\sigma^* = \sigma e^{\frac{\tau}{\tau_{\text{рел}}}},$$

где  $\tau_{\text{рел}} = \frac{\mu^*}{G} e^{\frac{Q}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T^*} \right)}$  — время релаксации;  $\mu^*$  — коэффициент вязкости материала при температурах, близких к температуре солидуса ( $\mu^* = 3,5 \cdot 10^9$  Па·с);  $G = G_0 e^{\frac{-k(T-T_0)}{T^*-T_0}}$  — модуль сдвига;  $G_0$  — значение модуля сдвига при контрольной температуре  $T_0 < T^*$  ( $G_0 = 5 \cdot 10^8$  Па;  $T_0 = 700$  °С;  $T^* = 1400$  °С;  $k = 4$ );  $Q = 269,93$  кДж/моль — энергия активации;  $R = 8,31$  Дж/(моль·К) — универсальная газовая постоянная.

С использованием разработанной математической модели был осуществлен многовариантный анализ процессов затвердевания и охлаждения. На рис. 2 приведены результаты расчетов максимальных термических напряжений по сечению затвердевшей корочки непрерывноли-

той заготовки размером  $0,250 \times 0,300$  м (сталь 80К, скорость разливки  $v = 0,8$  м/мин). Из рисунка видно, что распределение напряжений по сечению затвердевающей корочки заготовки является одинаковым на протяжении всего процесса затвердевания: в слое, примыкающем к границе «двухфазная зона–затвердевшая часть», наблюдаются растягивающие напряжения ( $\sim 14$  МПа), а в слое, расположенном вблизи охлаждаемой поверхности, — сжимающие ( $\sim 55$  МПа).

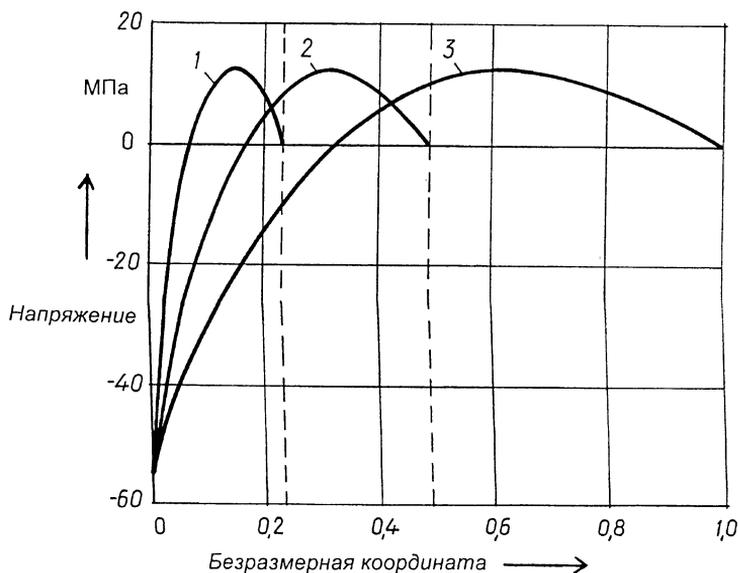


Рис. 2. Распределение максимальных термических напряжений по сечению затвердевшей корочки: 1 — на выходе из кристаллизатора; 2 — на выходе из ЗВО; 3 — полностью затвердевшая заготовка

Предел прочности для литой стали по известным литературным данным [7] принимаем  $\sigma_{пр} = 20$  МПа — для области высоких температур (температуры солидуса) и  $\sigma_{пр} = 60 \dots 70$  МПа — для температур охлаждаемой поверхности с соответствующей интерполяцией  $\sigma_{пр}$  в диапазоне  $T_S - T_{пов}$ . Анализ распределения термических напряжений по сечению корочки показывает, что расчетные значения напряжений не превышают предела прочности по всему сечению затвердевшей корочки. На основании проведенных расчетов предложены рабочие режимы разливки кордовой стали марок 70К, 75К, 80К, 85К:  $v = 0,65 \dots 0,8$  м/мин — для заготовок  $0,250 \times 0,300$  м;  $v = 0,6 \dots 0,7$  м/мин — для заготовок  $0,300 \times 0,400$  м. На рис. 3 приведена динамика температур в характерных точках сечения непрерывнолитой заготовки  $0,250 \times 0,300$  м при различных скоростях разливки.

Разработанные режимы разливки кордовых марок сталей прошли промышленное опробование и внедрены в условиях МНЛЗ-3 Республиканского унитарного предприятия «Белорусский металлургический завод».

Таким образом, с использованием предложенной методики представляется возможным определять температурное поле заготовки с уче-

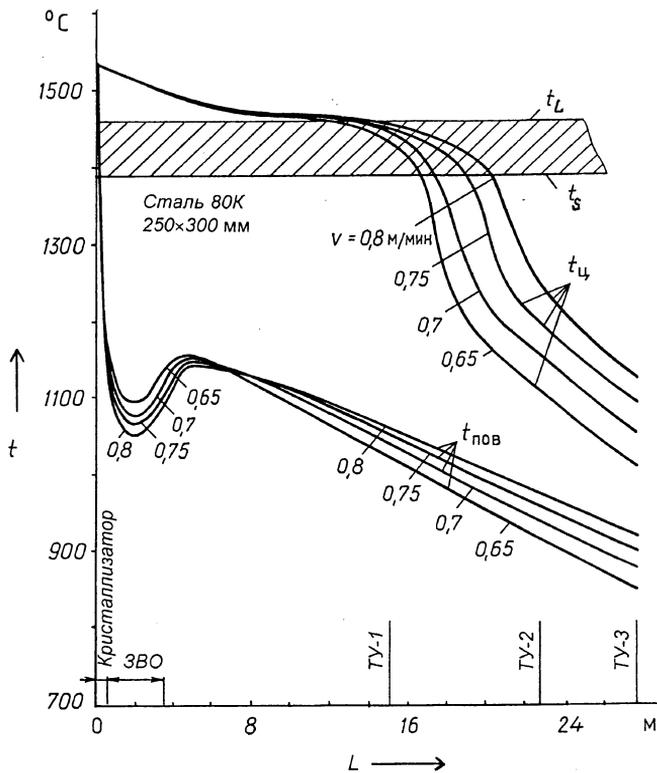


Рис. 3. Изменение температуры поверхности  $t_{пов}$  и центра  $t_{ц}$  непрерывнолитых заготовок при рациональных режимах разливки

том расхода охлаждаемой воды и скорости вытягивания, а также прогнозировать величину максимальных сжимающих термических напряжений по сечению заготовки в ходе затвердевания, охлаждения и последующего нагрева в проходной печи стана 850.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Тимошпольский В. И. Теплотехнологические основы металлургических процессов и агрегатов высшего технического уровня. — Мн.: Наука і тэхніка, 1995. — 256 с.
2. Освоение ряда марок сталей для промышленного комплекса на машинах непрерывного литья заготовок Белорусского металлургического завода / Филиппов В. В., Фоменко А. П., Тимошпольский В. И. и др. // Литье и металлургия. — 1999. — № 4. — С. 26–27.
3. Филиппов В. В. Разработка ресурсосберегающих теплотехнологических процессов при производстве кордовых марок сталей: Дис. в форме науч. докл. ... канд. техн. наук: 05.16.02 / БГПА. — Мн., 2001. — 48 с.
4. Расчеты температурных полей и термических напряжений в растущей корочке при разливке стали на сортовых МНЛЗ / Ольшанский В. М., Тимошпольский В. И., Коваль Н. П. и др. // Литье и металлургия. — 2000. — № 1. — С. 61–63.
5. Тепловые процессы при непрерывном литье стали / Самойлович Ю. А., Крулевецкий С. А., Горяинов В. А., Кабаков З. К. — М.: Металлургия, 1982.
6. Самойлович Ю. А. Микрокомпьютер в решении задач кристаллизации слитка. — М.: Металлургия, 1988. — 180 с.
7. Лозинский М. Г. Строение и свойства металлов и сплавов при высоких температурах. — М.: Металлургия, 1963.

Представлена НТС УНПО  
«БГПА – БМЗ»

Поступила 11.06.2001