

Д.О. Бажуков, В.Д. Тутарова, Д.С. Сафонов

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»
(Новотроицкий филиал)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ НЕПРЕРЫВНОЛИТОЙ СЛЯБОВОЙ ЗАГОТОВКИ С УЧЕТОМ КОНСТРУКЦИОННЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ МНЛЗ

Аннотация. Рассмотрена математическая модель теплового состояния непрерывнолитой слябовой заготовки. Особенностью рассмотренной модели является явный учет схемы расположения форсунок и роликов в зоне вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок при задании граничных условий для уравнения теплопроводности. Полученная модель позволяет провести численный эксперимент с целью выявления способов совершенствования системы и режимов охлаждения заготовок.

Ключевые слова: математическая модель, тепловое состояние, непрерывнолитая заготовка, граничные условия третьего рода.

SLAB CONTINUOUSLY CAST SEMIS HEAT STATE MATHEMATICAL MODELING WITH ACCOUNT FOR CONTINUOUS CASTING MACHINE CONSTRUCTION PECULIARITIES

Abstract. A mathematical model of the thermal state of the slab continuous casting billet. Feature of our model is the explicit consideration of arrangements of nozzles and rollers secondary cooling zone of continuous casting machine as boundary conditions for the heat equation. The resulting model allows us to conduct numerical experiments in order to identify ways to improve the system and cooling modes blank.

Keywords: mathematical model, the thermal state, billets, the boundary conditions of the third kind.

Качество непрерывнолитых стальных заготовок, получаемых в машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), во многом зависит от их теплового состояния в процессе разлива. Получение информации о динамике температуры поверхности заготовки в процессе затвердевания связано со значительными техническими сложностями и высокой стоимостью, а контроль температуры по сечению практически невозможен. Поэтому на текущий момент наиболее практичным средством оценки теплового состояния заготовки является использование аппарата математического моделирования, с помощью которого производится расчет температуры заготовки по ее сечению по ходу движения вдоль технологической оси МНЛЗ.

На данный момент уже классическим является способ описания теплового состояния заготовки при помощи уравнения теплопроводности, предложенный В.Т. Борисовым [1], в котором наличие двухфазной зоны учитывается с помощью введения эффективных величин теплофизических параметров:

$$\rho C_3 \left(\frac{\partial t}{\partial \tau} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_3 \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_3 \frac{\partial t}{\partial y} \right), \quad (1)$$

где ρ – плотность металла, кг/м³; t – температура, °С; C_3 – эффективная теплоемкость, Дж/(кг·град); λ_3 – эффективная теплопроводность, Вт/(м·град). Для расчета эффективных величин вводится относительное коли-

чество твердой фазы ψ , которое для заданной температуры определяется как

$$\psi = \frac{t_{\text{л}} - t}{t_{\text{л}} - t_{\text{с}}}, \quad (2)$$

где $t_{\text{л}}$ и $t_{\text{с}}$ – температуры ликвидуса и солидуса, соответственно. Тогда значения эффективных величин можно рассчитать следующим образом:

$$C_3 = \begin{cases} C_{\text{ж}}, & t > t_{\text{л}} \\ C_T \psi + C_{\text{ж}}(1 - \psi) + L \frac{\partial \psi}{\partial t}, & t_{\text{с}} \leq t \leq t_{\text{л}} \\ C_T, & t < t_{\text{с}} \end{cases} \quad (3)$$

$$\lambda_3 = \begin{cases} \lambda_{\text{ж}}, & t > t_{\text{л}} \\ \lambda_T \psi + \lambda_{\text{ж}}(1 - \psi), & t_{\text{с}} \leq t \leq t_{\text{л}} \\ \lambda_T, & t < t_{\text{с}} \end{cases} \quad (4)$$

где L – скрытая теплота кристаллизации, Дж/кг.

На поверхности заготовки задаются граничные условия третьего рода:

$$-\lambda_3 \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{y=0, y=h} = \alpha(t_{\text{п}} - t_{\text{с}}), \quad -\lambda_3 \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{x=0, x=w} = \alpha(t_{\text{п}} - t_{\text{с}}), \quad (5)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·град); $t_{\text{п}}$ – температура поверхности металла °С; $t_{\text{с}}$ – температура

среды, °С; w и h – ширина и толщина заготовки, м. Поскольку уравнение теплопроводности решается в двумерном виде, для сечения заготовки требуется задать четыре группы граничных условий – по числу граней заготовки.

В рассмотренных работах по моделированию теплового состояния заготовок [2 – 4] коэффициент теплоотдачи принимался постоянным для каждого сегмента зоны вторичного охлаждения (ЗВО), что является весьма грубым допущением. Характер теплоотдачи с поверхности заготовки сильно меняется по ходу перемещения расчетного сечения внутри секции ЗВО. На участках поверхности, непосредственно орошаемых при помощи водяных или водовоздушных форсунок (рис. 1, зона 1), а так же в местах контакта с водоохлаждаемыми роликами (рис. 1, зона 3) теплоотвод происходит значительно интенсивнее, чем на остальной площади (рис. 1, зона 2).

Было проведено исследование теплового состояния непрерывнолитой слябовой заготовки сечением 270×1200 мм при рабочей скорости вытягивания 0,8 м/мин, получаемой в условиях МНЛЗ № 2 электросталеплавильного цеха ОАО «Уральская Сталь».

Визуальный осмотр поверхности заготовки на выходе из бункера ЗВО (рис. 2) показал наличие захлаженной полосы в центральной части, образовавшейся, очевидно, в результате неравномерного охлаждения.

С целью изучения участков образования зон перерождения было проведено математическое моделирование затвердевания слябовой заготовки. Для учета различных условий теплоотдачи от заготовки в ЗВО и получения достоверных результатов моделирования, коэффициент теплоотдачи α задавался индивидуально для каждой точки поверхности на каждом временном

шаге моделирования. Таким образом, коэффициент теплоотдачи был представлен функцией от координат точки поверхности заготовки, плотности орошения ее поверхности в данной точке и наличия контакта с роликом, приведенной ниже:

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_i + k \cdot 1570 \cdot \omega(x, y)^{0,55} \times \\ \times (1 - 0,0075 \cdot (t_b - 273,15)) - \text{в зоне} \\ \text{непосредственного орошения;} \\ \alpha_i + \alpha_p - \text{в зоне контакта с роликами;} \\ \alpha_i + \alpha \sigma \frac{t(x, y)_n^4 - t_c^4}{t(x, y)_n - t_c} - \text{на остальных} \\ \text{участках поверхности.} \end{cases} \quad (6)$$

Здесь $\omega(x, y)$ – локальная плотность орошения, л/(м²·с); ε – приведенный коэффициент черноты тела; σ – постоянная Стефана-Больцмана; x, y – координаты точки сечения заготовки; k – калибровочный коэффициент для учета особенностей конкретной МНЛЗ; $t(x, y)_n$ – температура поверхности заготовки в указанной точке, °С; t_c – температура среды, °С. Указанный способ расчета коэффициента теплоотдачи на орошаемой поверхности предложен в работе [5].

Для расчета локальной плотности орошения $\omega(x, y)$ поверхности принято допущение, что плотность орошения форсунки по линии факела распределена нормально, а при наложении факелов она суммируется. Протяженность области, орошаемой одной форсункой, зависит от угла ее раскрытия и положения, и составляет

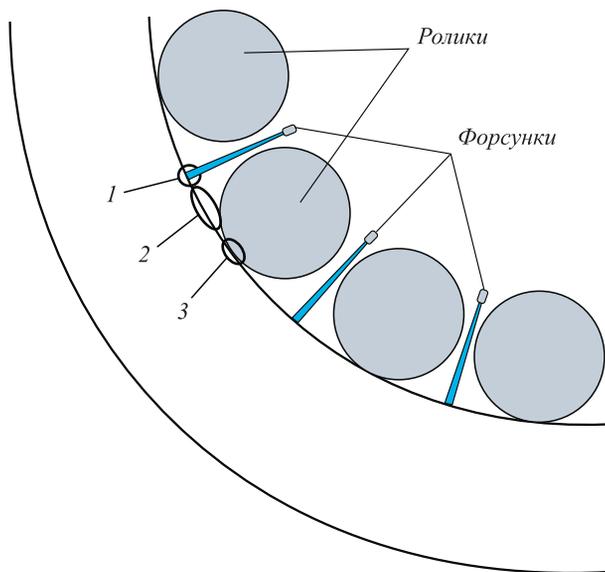


Рис. 1. Участки поверхности заготовки с различным характером теплоотдачи:
1 – 3 – номера зон

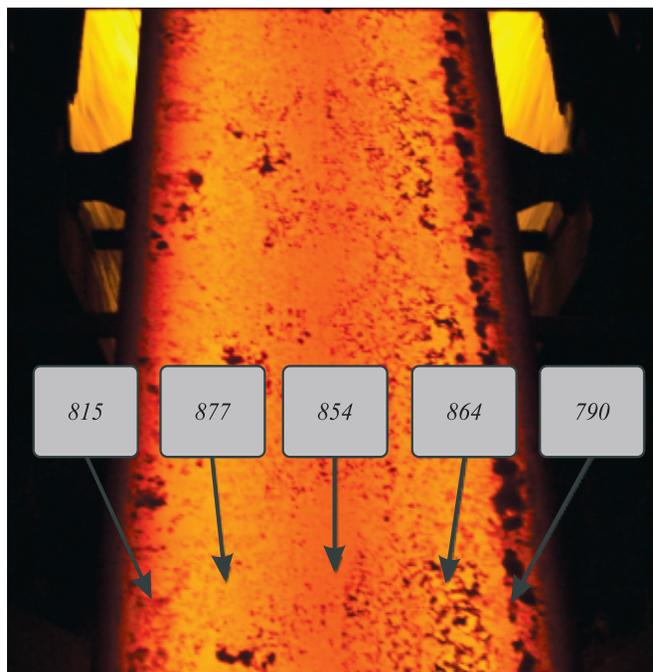


Рис. 2. Внешний вид поверхности заготовки на выходе из ЗВО с указанием температуры (°С) в различных точках поверхности по ширине заготовки

$$l = 2htg\left(\frac{\beta}{2}\right), \quad (7)$$

где h – расстояние между форсункой и поверхностью, м, β – угол раскрытия форсунки, рад.

Полученная математическая модель реализована на ЭВМ с приведением дифференциальных уравнений к уравнениям в конечных разностях, при этом была использована неявная схема, обеспечивающая безусловную сходимость. Результатами моделирования являются «снимки» температурного поля сечения заготовки по ходу ее движения в ЗВО.

Адекватность разработанной модели подтверждается соответствием результатов моделирования фактическим замерам температуры. Для примера, на рис. 3 представлены графики температуры поверхности верхней грани заготовки на выходе из ЗВО, полученные в результате экспериментальных замеров при помощи пирометра и результаты моделирования.

Анализ результатов моделирования позволил определить, что переохлаждение центральной полосы развивается в секциях № 12 – 16. На основе результатов математического моделирования были предложены рекомендации по изменению схемы расстановки форсунок в секциях № 4 – 11 и снижению подачи охладителя в секциях № 12 – 16. На рис. 4 представлены результаты моделирования температурного поля поверхности верхней грани заготовки при существующих условиях (сплошные линии) и после применения предложенных мероприятий (пунктирные линии).

Предложенные мероприятия позволят существенно снизить температурные перепады по сечению заготовки и, как следствие, повысить качество макроструктуры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Борисов В.Т. Теория двухфазной зоны металлического слитка. – М.: Металлургия, 1987. – 222 с.
2. Тепловые процессы при непрерывном литье стали / Под ред. Ю.А. Самойловича. – М.: Металлургия, 1982. – 152 с.
3. Емельянов В.А. Тепловая работа машин непрерывного литья заготовок. – М.: Металлургия, 1988. – 143 с.

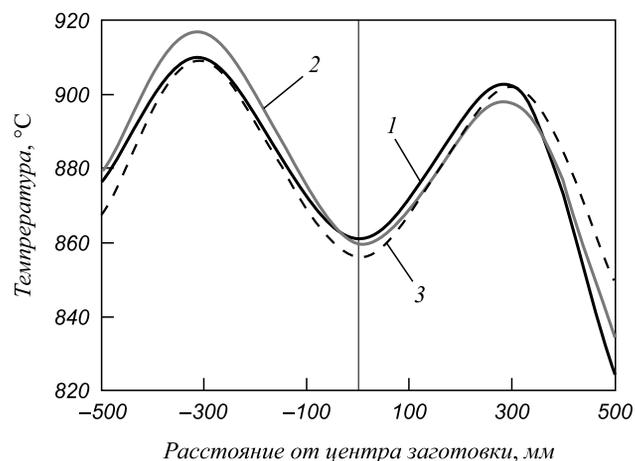


Рис. 3. Графики температуры поверхности верхней грани заготовки на выходе из ЗВО:

1 – серия 1; 2 – серия 2; 3 – модель

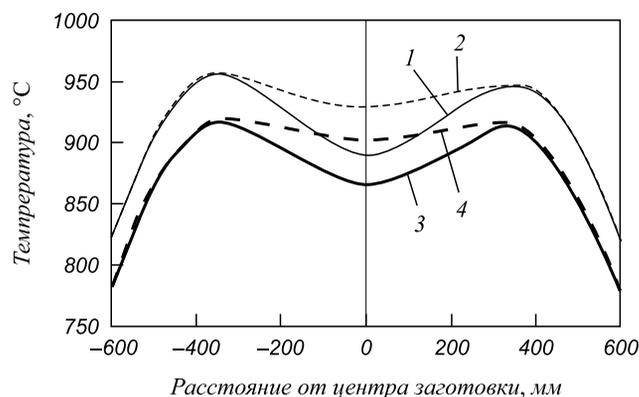


Рис. 4. Графики температуры поверхности заготовки на выходе из секций № 13 (1, 2) и № 16 (3, 4) до (сплошные линии) и после применения предложенных мероприятий (пунктирные линии)

4. Теория непрерывной разливки / В.С. Рутес, А.И. Аскольдов и др. – М.: Металлургия, 1971. – 296 с.
5. Houfa Shen, Richard A. Hardin, Robert MacKenzie, C. // Journal of Materials Science and Technology. 2002. Vol. 18. P. 311 – 314.

© 2013 г. Д.О. Бажуков, В.Д. Тутарова, Д.С. Сафонов
Поступила 21 ноября 2012 г.