

УДК 621.746.62.001.57

А.Н. КАЛИТАЕВ, канд. техн. наук, доц., ФГБОУ ВПО
Магнитогорский государственный технический университет,
Магнитогорск, Россия,

В.Д. ТУТАРОВА, канд. техн. наук, доц., ФГБОУ ВПО
Магнитогорский государственный технический университет,
Магнитогорск, Россия,

Ю.В. ПОНОМАРЕВ, магистр, ФГБОУ ВПО Магнитогорский
государственный технический университет, Магнитогорск, Россия

К ВОПРОСУ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ВНЕШНЕГО ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ЗАГОТОВКИ В СОРТОВЫХ МНЛЗ

На основе метода одномерной безусловной оптимизации (метод Фибоначчи) и математической модели затвердевания заготовки рассмотрена идентификация параметров внешнего теплообмена при охлаждении заготовки в сортовых машинах непрерывного литья заготовки на примере пятиручьевых сортовых машинах непрерывного литья заготовки радиального типа фирмы VAI. Ил.: 3. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: оптимизация, идентификация, теплообмен, МНЛЗ, модель.

Постановка проблемы. В настоящее время объем производства сортовой заготовки составляет более 380 млн. т в год и постоянно увеличивается. К росту объема непрерывнолитой сортовой заготовки приводит постоянное совершенствование технологии и непрерывное освоение новых машин непрерывного литья. На текущий момент в странах СНГ насчитывается более 30 МНЛЗ по производству сортовой заготовки.

В 2004 году в ОАО "Магнитогорский металлургический комбинат" в электросталеплавильном цехе были введены в эксплуатацию две пятиручьевых сортовых МНЛЗ австрийской фирмы VAI с общей проектной производительностью 2 млн. т заготовки в год. На машине применяется гильзовый многоконусный кристаллизатор "Diamold" высотой 900 мм. На первом участке зоны вторичного охлаждения применяется водяное охлаждение, а на трех остальных – водовоздушное.

Внешний теплообмен непрерывнолитой заготовки при охлаждении в ЗВО на поверхности характеризуется коэффициентами теплоотдачи по длине МНЛЗ, которые связаны с интенсивностью охлаждения заготовки по периметру, выбранной из условий получения качественного металла на выходе из МНЛЗ. Для обеспечения равномерного охлаждения заготовки по длине ЗВО предусматривается несколько секций с

различной интенсивностью отвода тепла [1]. Интенсивность охлаждения во вторичной зоне должна выбираться таким образом, чтобы температура поверхности заготовки в процессе ее движения вдоль технологической оси МНЛЗ медленно снижалась.

Анализ литературы. Исследования внешнего теплообмена непрерывнолитой заготовки при охлаждении в ЗВО отражены в работах В.Т. Борисова, Ю.А. Самойловича, В.А. Журавлева, В.В. Соболева, А.И. Вейника, Д.П. Евтеева, Д.Х. Девятова и др. [2 – 7]. Методика решения задачи определения коэффициентов теплоотдачи непрерывнолитой слябовой заготовки по экспериментальным значениям температуры поверхности при охлаждении заготовки в ЗВО МНЛЗ описана в работе [3]. В работе [2] приведена зависимость между коэффициентом теплоотдачи и удельными расходами воды для слябовой МНЛЗ. Используя те или иные цифровые модели, авторами [4] получено изменение во времени (или по высоте машины) коэффициента теплоотдачи для выбранной скорости литья, сечения заготовки и марки стали для двумерного и одномерного случаев. В [5] для идентификации параметров внешнего теплообмена (коэффициенты теплоотдачи) в зоне вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок рассмотрены алгоритмы на основе метода наименьших квадратов для сплайн аппроксимации распределённого в пространстве параметра и оперативной настройки с текущими реальными условиями технологического процесса. В [6] параметрическая идентификация параметров внешнего теплообмена (расход охладителя) крупного стального слитка в ЗВО МНЛЗ проведена на методе стохастической аппроксимации по критерию минимизации квадратичной ошибки. В [7] рассмотрены методы определения интенсивности теплообмена на поверхности слитка (сляба) в ЗВО в зависимости от влияющих факторов. Основными факторами являются удельный расход воды, подаваемой на поверхность слитка из форсунок, а также неуправляемый теплообмен с роликками. Однако вопросы идентификации параметров внешнего теплообмена при охлаждении заготовки в сортовых МНЛЗ изучены недостаточно.

Цель статьи – идентификация параметров внешнего теплообмена при охлаждении заготовки в сортовых МНЛЗ на основе математической модели затвердевания непрерывнолитой заготовки и метода одномерной безусловной оптимизации.

Постановка задачи. Задача подготовки данных для расчета уточненных режимов охлаждения, представляет собой задачу

идентификации коэффициентов теплоотдачи по длине поверхности заготовки на основе распределения температур по поверхности, заданного из условий рационального охлаждения по Д.П. Евтееву [2]:

$$T_{\text{пов}}(x, l) = \frac{T_{\text{пов}}^0(x, l)}{(l - h_k + 1)^n}, \quad (1)$$

где $T_{\text{пов}}(x, l)$ и $T_{\text{пов}}^0(x, l)$ – температура поверхности заготовки соответственно при текущем значении l и $l = h_k$, К; l – текущая длина заготовки, мм; $n = \ln(T_{\text{пов}}^0(x, l)/800) / \ln(L - h_k + 1)$, L – полная длина заготовки от мениска в кристаллизаторе до конца зоны вторичного охлаждения, мм; h_k – рабочая высота кристаллизатора, мм.

Использование аналитического аппарата математического программирования требует выбора такого критерия (или функционала), экстремальное значение которого (max, min) достигалось бы при оптимальных, с нашей точки зрения, параметрах в оптимизируемом процессе.

Задача ставится следующим образом: требуется найти такую кусочно-постоянную функцию $\alpha(l)$ распределения коэффициента теплоотдачи по длине технологической оси МНЛЗ, которая соответствует минимуму функционала [3]

$$J(\alpha) = \int_W^L \int_L (T^*(x, l) - T(x, l))^2 dx dl, \quad (2)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); $T^*(x, l)$ – рекомендуемое распределение температуры по поверхности заготовки, рассчитанное по формуле (1), К; $T(x, l)$ – распределение температуры по поверхности заготовки, полученное при решении уравнения теплопроводности с заданными коэффициентами теплоотдачи α , К; W – ½ ширины заготовки, м; x – координата по поверхности заготовки со стороны малого радиуса МНЛЗ; L – технологическая длина МНЛЗ, м; l – координата по длине заготовки вдоль технологической оси МНЛЗ.

Математическая модель. Для определения характера распределения температуры поверхности заготовки $T(x, l)$ проанализируем процесс теплопереноса в ней, на двух границах которой

осуществляется теплообмен с внешней средой за счет излучения и конвекции. Область решения представлена на рис. 1.

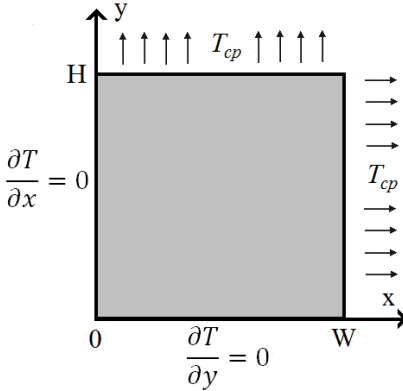


Рис. 1. Область решения задачи теплопереноса в заготовке

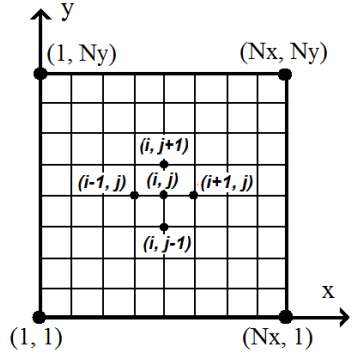


Рис. 2. Разностная сетка области решения

Математическая постановка задачи имеет вид:

$$\rho \cdot c_{эф}(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_{эф}(T) \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad \left| \begin{array}{l} 0 < x < W; \\ 0 < y < H, \end{array} \right. \quad (3)$$

где ρ – плотность металла, кг/м³; $c_{эф}(T)$ – эффективная теплоемкость металла, Дж/(кг·К); T – температура металла, К; $\lambda_{эф}(T)$ – эффективная теплопроводность металла, Вт/(м·К); t – координата по времени; x, y – координаты поперечного сечения заготовки; H – 1/2 толщины заготовки, м.

Коэффициенты $c_{эф}(T)$ и $\lambda_{эф}(T)$ определяются в зависимости от температуры фазового состояния металла [4].

Температура ликвидус определяется с учетом влияния содержания в металле химических элементов, а для определения температуры солидус использовались аппроксимирующие функции линии солидус в области диаграммы состояния системы Fe-C [8].

Начальные и граничные условия запишутся в виде:

$$\tau = 0: \quad | \quad T = T_0, \quad 0 \leq x \leq W, \quad 0 \leq y \leq H; \quad (4)$$

$$D = C \left[\left(\frac{T_{\text{пов}_x}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{cp}}}{100} \right)^4 \right];$$

$$\tau > 0: \quad \left\{ \begin{array}{l} x = 0: \quad \frac{\partial T}{\partial x} = 0; \quad x = W: \quad -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha \cdot (T_{\text{пов}_x} - T_{\text{cp}}) + D; \\ y = 0: \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0; \quad y = H: \quad -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \cdot (T_{\text{пов}_y} - T_{\text{cp}}) + D, \end{array} \right.$$

где T_0 – температура металла в промежуточном ковше, К; $C = \varepsilon \cdot C_0$ – коэффициент теплообмена излучением, нВт/(м²·К⁴); ε – степень черноты стальной заготовки; C_0 – постоянная Стефана-Больцмана, $5.67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴); T_{cp} – температура окружающей среды, К; $T_{\text{пов}_x}$, $T_{\text{пов}_y}$ – температуры поверхностей заготовки, К.

Для аппроксимации дифференциального уравнения (3) разностным введем пространственно-временную сетку с координатами

$$x_i = (i-1)h_x, \quad y_j = (j-1)h_y, \quad \tau_n = n\tau, \quad l_n = \nu\tau_n,$$

где $i = \overline{1, N_x}$; h_x, h_y – шаги сетки по координатам x, y соответственно; t – шаг по времени; $j = \overline{1, N_y}$, $n = \overline{0, K}$, K – количество итераций по времени t ; ν – скорость вытягивания заготовки, м/мин. То есть на всю расчетную область по сечению заготовки накладываем сетку, представленную на рис. 2.

Для решения задачи (3) – (4) введем равномерную пространственно-временную сетку, в результате чего шаг по времени реализуется в два этапа – на промежуточном временном шаге проводим дискретизацию уравнения (3) только в направлении оси x и получаем одномерное уравнение, затем проводим дискретизацию уравнения (3) в направлении оси y и, решая полученное одномерное уравнение, определяем поле температуры на целом шаге по времени [9]. Полученные разностные уравнения сводятся к трехдиагональному виду и решаются последовательно методом прогонки.

Для идентификации коэффициентов теплоотдачи применяется метод одномерной безусловной оптимизации – метод Фибоначчи. Данный метод при заданном интервале неопределенности (диапазон изменения

коэффициентов теплоотдачи в ЗВО МНЛЗ) позволяет за определенное количество итераций найти решение с заданным уровнем точности.

В начальный момент времени температурное поле принимается однородным: температура во всем объеме постоянна и равна температуре металла в промежуточном ковше.

На основе математической модели была разработана компьютерная программа на языке Object Pascal для проведения идентификации параметров модели внешнего теплообмена заготовки в сортовых МНЛЗ.

Результаты моделирования. Численный эксперимент проводился для заготовки сечением 170×152 мм при следующих условиях. Была выбрана марка стали СтЗсп, разливаемая со скоростью вытягивания 2,8 м/мин с химическим составом, представленным в табл. 1.

Таблица 1
Химический состав стали марки СтЗсп

Химический элемент	[C]	[Mn]	[Si]	[S]	[P]	[Cr]	[Ni]	[Cu]
Содержание, %	0,18	0,52	0,23	0,014	0,012	0,15	0,15	0,15

Для данного химического состава температура ликвидус составляет 1512°C , температура солидус – 1492°C . В соответствии с рекомендациями технологической инструкции принимаем температуру металла в промежуточном ковше 1535°C . Моделирование проводили для "мягкого" режима охлаждения (температура заготовки на выходе 950°C). По результатам моделирования были получены распределения температуры заготовки в заданных точках по ее сечению вдоль технологической оси МНЛЗ (рис. 3).

При рекомендуемом распределении температур выполнена идентификация коэффициентов теплоотдачи с поверхности заготовки и выполнен расчет расхода охладителя для каждой ЗВО (табл. 2).

Таблица 2
Параметры теплообмена в сортовой МНЛЗ

Параметр	I зона	II зона	III зона	IV зона
Расход воды, л/мин	66 (91,3)*	67,4 (60,9)*	38,6 (49,4)*	25,6 (30)*
Коэффициент теплоотдачи, Вт/(м ² ·К)	565,6	468,5	194,4	127,5

* – в скобках указан расход воды в соответствии с инструкцией [10].

Анализ данных, представленных в табл. 2, выявил необходимость снижения расхода охладителя в I, III и IV зонах вторичного охлаждения по сравнению с действующими режимами охлаждения, что позволит получить температуру заготовки на выходе из ЗВО выше температуры провала пластичности, и как следствие, улучшить ее качество и получить значительный экономический эффект от экономии технической воды.

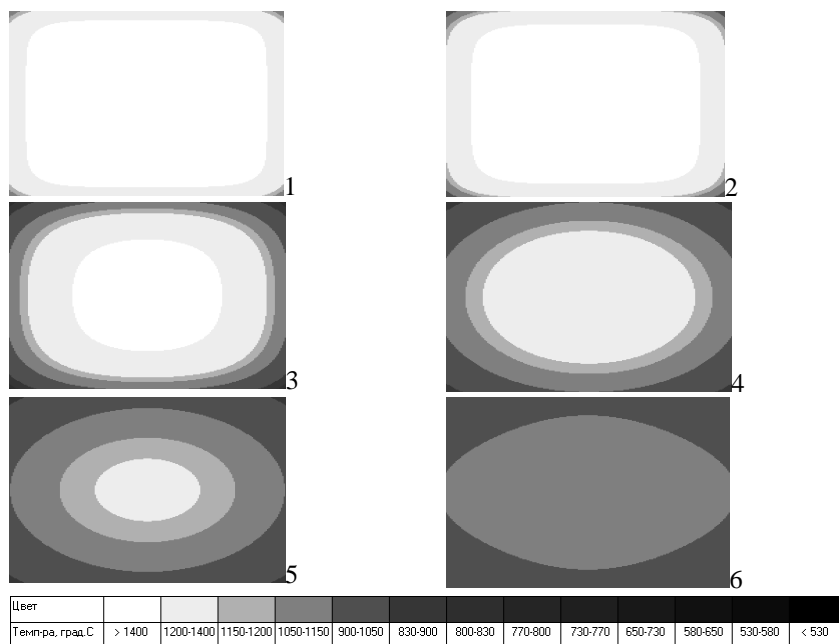


Рис. 3. Температура заготовки по ее сечению при "мягком" режиме охлаждения:
 1 – на выходе из кристаллизатора; 2 – на выходе из I зоны;
 3 – на выходе из II зоны; 4 – на выходе из III зоны;
 5 – на выходе из IV зоны; 6 – перед МГР

Выводы. Применение рассмотренного метода позволит реализовать серию расчетов параметров теплообмена непрерывнолитой заготовки, расширить знание основных особенностей тепловой работы зоны вторичного охлаждения и на этом основании прогнозировать основные параметры режимов охлаждения заготовок на действующих сортовых машинах при повышении их производительности, а также обосновано использовать полученные знания при проектировании новых машин и технологий непрерывной разливки.

Список литературы: 1. *Смирнов А.Н., Подкорытов А.Л.* Современные сортавые МНЛЗ: Перспективы развития технологии и оборудования. [Электронный ресурс]: Донецкий национальный технический университет, ОАО "Енакиевский металлургический завод". – Режим доступа к ресурсу: <http://uas.su/articles/continuouscasting/00001.php>. 2. *Самойлович Ю.А.* Тепловые процессы при непрерывном литье стали / *Ю.А. Самойлович, С.Л. Крулевецкий, В.А. Горяинов, З.К. Кабаков.* – М.: Металлургия, 1982. – 152 с. 3. *Девятков Д.Х.* Определение коэффициентов теплоотдачи в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ с помощью идентифицируемой математической модели / *Д.Х. Девятков, И.И. Пантелеев* // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1999. – № 8. – С. 62-65. 4. *Борисов В.Т.* Теория двухфазной зоны сплавов и ее применение к задачам непрерывного слитка. / *В.Т. Борисов, И.Н. Голиков, А.И. Манохин, Р.А. Уразаев* // Непрерывная разливка стали. – 1974. – № 2. – С. 5-28. 5. *Ткаченко В.Н.* Идентификация параметров внешнего теплообмена в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ / *В.Н. Ткаченко, А.А. Иванова, Г.Р. Василья* // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2007. – № 39. – С. 168-177. 6. *Салихов К.З.* Адаптивная система автоматического управления процессом охлаждения крупного стального слитка в ЗВО МНЛЗ: модели и алгоритмы: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / *Салихов Кирилл Зуфарович.* – М., 2011. – 26 с. 7. *Лукин С.В.* Совершенствование теплообмена при охлаждении металла на машинах непрерывного литья заготовок: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.14.04 / *Лукин Сергей Владимирович.* – Иваново, 2013. – 40 с. 8. Температура плавления стали. [Электронный ресурс]: Лаборатория крупного слитка. Внепечная обработка и разливка стали. Технологии и агрегаты. – Режим доступа к ресурсу: http://steelcast.ru/melting_temperature. 9. *Кузнецов Г.В.* Разностные методы решения задач теплопроводности: учебное пособие / *Г.В. Кузнецов, М.А. Шеремет.* – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 172 с. 10. Разливка стали на сортавых машинах непрерывного литья заготовок МНЛЗ № 1 и 2 (МНЛЗ № 1 и 2) мартеновского цеха: Временная технологическая инструкция. – Магнитогорск. – 2004. – 35 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Smirnov A.N., Podkorytov A.L.* Sovremennye sortovye MNLZ: Perspektivy razvitiya tehnologii i oborudovaniya. [Elektronnyj resurs]: Doneckij nacional'nyj tehniceskij universitet, OAO "Enakievskij metallurgicheskij zavod". – Rezhim dostupa k resursu: <http://uas.su/articles/continuouscasting/00001.php>. 2. *Samojlovich Ju.A.* Teplovyje processy pri nepreryvnom lit'e stali / *Ju.A. Samojlovich, S.L. Kruleveckij, V.A. Gorjainov, Z.K. Kabakov.* – M.: Metallurgija, 1982. – 152 s. 3. *Devjatov D.H.* Opredelenie koefficientov teplotodachi v zone vtorichnogo ohlazhdenija MNLZ s pomoshh'ju identifikiruemoj matematicheskoj modeli / *D.H. Devjatov, I.I. Pantelev* // Izv. vuzov. Chernaja metallurgija. – 1999. – № 8. – S. 62-65. 4. *Borisov V.T.* Teorija dvuhfaznoj zony splavov i ee primenenie k zadacham nepreryvnogo slitka. / *V.T. Borisov, I.N. Golikov, A.I. Manohin, R.A. Urazaev* // Nepreryvnaja razlivka stali. – 1974. – № 2. – S. 5-28. 5. *Tkachenko V.N.* Identifikacija parametrov vneshnego teplotobmena v zone vtorichnogo ohlazhdenija MNLZ / *V.N. Tkachenko, A.A. Ivanova, G.R. Vasiljan* // Vestnik NTU "HPI". Serija: Informatika i modelirovanie. – Har'kov: NTU "HPI". – 2007. – № 39. – S. 168-177. 6. *Salihov K.Z.* Adaptivnaja sistema avtomaticheskogo upravlenija processom ohlazhdenija krupnogo stal'nogo slitka v ZVO MNLZ: modeli i algoritmy: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk: 05.13.06 / *Salihov Kirill Zufarovich.* – M., 2011. – 26 s. 7. *Lukin S.V.* Sovershenstvovanie teploobmena pri ohlazhdenii metalla na mashinah nepreryvnogo lit'ja zagotovok: avtoref. dis. ... dokt. tehn. nauk: 05.14.04 / *Lukin Sergej Vladimirovich.* – Ivanovo, 2013. – 40 s. 8. Temperatura plavljenija stali. [Elektronnyj resurs]: Laboratorija krupnogo slitka. Vnepechnaja obrabotka i razlivka stali. Tehnologii i agregaty. – Rezhim dostupa k resursu: http://steelcast.ru/melting_temperature. 9. *Kuznecov G.V.* Raznostnye metody reshenija zadach teploprovodnosti: uchebnoe posobie. / *G.V. Kuznecov, M.A. Sheremet.* – Tomsk: Izd-vo TPU, 2007. – 172 s. 10. Razlivka stali na sortovyh mashinah nepreryvnogo lit'ja zagotovok MNLZ № 1 i 2 (MNLZ № 1 i 2) martenovskogo cexa: Vremennaja tehnologicheskaja instrukcija. – Magnitogorsk. – 2004. – 35 s.

2 (MNLZ №1 i 2) martenovskogo seha: Vremennaja tehnologičeskaja instrukcija. – Magnitogorsk. – 2004. –35 s.

Поступила (received) 15.04.2014

Статью представил д-р техн. наук, проф. ФГБОУ ВПО "МГТУ" Девятков Д.Х.

Kalitaev Alexander, Ph.D., Associate Professor
Magnitogorsk State Technical University named after GI Nosov
Str. behalf of the newspaper "Pravda", 63-35, Magnitogorsk, Russia, 455026
tel./phone: +79068539550, e-mail: alex_mgtu@mail.ru
ORCID ID: 0000-0002-5984-967X

Tutarova Vlasta, Ph.D., Associate Professor
Magnitogorsk State Technical University named after GI Nosov
Str. Western highway, 50, Magnitogorsk, Russia, 455000
tel./phone: +79030915315, e-mail: vlasta_dev@mail.ru
ORCID ID: 0000-0002-4615-6284

Ponomarev Yury, master
Magnitogorsk State Technical University named after GI Nosov
Pr. Lenina, 38, Magnitogorsk, Russia, 455000
tel./phone: +7(3519)298563, e-mail: vt-pm@magtu.ru