

ПРОГНОЗНОЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СОРТОВОГО ПРОКАТА НА УЧАСТКЕ МНЛЗ – НАГРЕВАТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО

Рассмотрены основные положения, лежащие в основе разработанного комплекса, предназначенного для прогнозного математического моделирования температурного состояния металла при производстве сортового проката на участке МНЛЗ – нагревательное устройство. При этом данный комплекс может быть использован как в условиях литейно-прокатного агрегата, так и при разомкнутой производственной схеме. В его основе лежит моделирование температурного состояния произвольного движущегося поперечного сечения заготовки при учете изменения граничных условий и скорости его перемещения в зависимости от местонахождения.

Ключевые слова: сортовой прокат, МНЛЗ, нагревательное устройство, литейно-прокатный агрегат, температурное состояние, прогнозная математическая модель.

Постановка проблемы

В настоящее время российская металлургия переживает очередной виток кризиса, связанного с санкционной политикой западных стран, проявляющейся в запрете на покупку металла, который произведен на металлургических предприятиях РФ, и в блокировании взаимодействия своих предприятий с партнерами РФ в плане поставок оборудования и материалов, сервисного обслуживания ранее поставленного оборудования.

Важным элементом современного металлургического оборудования является система автоматического управления САУ. Базовым элементом САУ или как минимум инструментом для ее разработки являются соответствующие прогнозные математические модели [1].

К сожалению, в рамках сортопрокатного производства на предприятиях РФ значительная часть оборудования произведена иностранными компаниями. Используемые САУ в данном случае также разработаны иностранными компаниями и во многом представляют собой «черный ящик».

Примеры всестороннего практического использования прогнозных математических моделей, созданных российскими учеными, достаточно редки. Поэтому имеет место ситуация, когда наработано достаточно много интересных прогнозных математических моделей, а с другой стороны нет возможности их интеграции (или зависимостей, полученных с их помощью) в функционирующие САУ иностранного произ-

водства. Ситуация, возникшая в последнее время, инициирует необходимость создания САУ собственного производства и потому российские ученые должны быть готовы к внедрению собственных разработок такого плана.

Анализ последних исследований и публикаций

За последние десятилетия в отечественной и иностранной практике разработано большое количество прогнозных математических моделей тепловой работы МНЛЗ (например, [2,3]) и нагревательных печей (например, [4,5]). Следует иметь в виду, что обычно на предприятии имеются отдельные САУ МНЛЗ и нагревательного устройства и, соответственно, отдельные математические модели. Даже в тех случаях, когда имеется единая САУ, есть основания полагать, что температурное поле металла для МНЛЗ и нагревательного устройства описывается при помощи различных моделей. Кроме того, возможны разные схемы реализации технологического процесса на участке МНЛЗ – нагревательное устройство: литейно-прокатный агрегат (ЛПА) или традиционная разомкнутая схема.

Разработка единого комплекса для прогнозного математического моделирования процессов, протекающих как в МНЛЗ, так и в нагревательном устройстве, подходящего для разных схем реализации технологического процесса на участке МНЛЗ – нагревательное устройство продолжает быть актуальной задачей.

Цель (задачи) исследования

Целью данной работы является создание единой прогнозной математической модели для описания температурного состояния металла на участке МНЛЗ – нагревательное устройство, подходящей как для ЛПА, так и для разомкнутых технологических схем.

Основной материал исследования

Выплавленная и доведенная на УКП сталь разливается на сортовой МНЛЗ и далее, в случае разомкнутой технологической схемы, полученные сортовые заготовки через склад поступают в прокатный цех, нагреваются до заданного теплового состояния в проходной печи и поступают на стан [6]. В случае использования ЛПА, для обеспечения использования теплоты непрерывнолитых заготовок обеспечивается их непосредственное поступление в печь для минимального догрева (в случае необходимости) или выравнивания температурного поля по сечению заготовки.

Таким образом, с одной стороны, имеем качественно отличающиеся процессы в МНЛЗ (затвердевание и охлаждения) и нагревательном устройстве (нагрев), а, с другой стороны, существенные отличия между ЛПА и разомкнутой схемой (хотя здесь в целом имеется качественное совпадение процессов). Однако, несмотря на вышесказанное, необходимо иметь внимание на тот факт, что температурное состояние металла во всех случаях описывается при помощи одного и того же дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности, а отличие процессов нагрева и охлаждения можно учесть за счет задания граничных условий теплообмена.

Для определения температурного состояния заготовки рассматривается условно выбранное поперечное расчетное сечение. Оно движется вдоль технологической оси агрегата, в котором находится в текущий момент времени (МНЛЗ или нагревательное устройство) со скоростью перемещения материала.

Математическая модель для определения температурного состояния традиционно базируется на решении дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности. Поскольку рассматривается поперечное сечение сортовой заготовки, задача ставится в двухмерной постановке в декартовой прямоугольной системе координат [7]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{\rho c_{\phi}} \cdot \left(\frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial z} \right) \right), \quad (1)$$

где y, z – координаты, отсчитываемые вдоль осей симметрии поперечного сечения заготовки, м.

Задание геометрических и начальных условий для задачи такого рода рассмотрено в работах [8,9].

Поскольку рассматриваемое расчетное поперечное сечение заготовки при своем движении (как в рамках одного агрегата, так и при переходе от одного агрегата к другому) последовательно проходит участки с различными закономерностями теплообмена, необходимо разработать способ вариантного задания граничных условий теплообмена на поверхности расчетного сечения.

При использовании наиболее распространенных граничных условий третьего рода [10] для задания значений итогового коэффициента теплоотдачи α и температуры среды T_{cp} для конкретных узлов на поверхности расчетного сечения предлагается использовать выражения следующего типа:

$$\alpha(x, y, z) = \begin{cases} \alpha_1^B(y, a/2) \text{ при } x \leq L_1 \\ \alpha_1^H(y, -a/2) \text{ при } x \leq L_1 \\ \alpha_1^П(a/2, z) \text{ при } x \leq L_1 \\ \alpha_1^Л(-a/2, z) \text{ при } x \leq L_1 \\ \alpha_2^B(y, a/2) \text{ при } L_1 < x \leq L_2 \\ \alpha_2^H(y, -a/2) \text{ при } L_1 < x \leq L_2 \\ \alpha_2^П(a/2, z) \text{ при } L_1 < x \leq L_2 \\ \alpha_2^Л(-a/2, z) \text{ при } L_1 < x \leq L_2 \\ \dots \\ \alpha_i^B(y, a/2) \text{ при } L_{i-1} < x \leq L_i \\ \alpha_i^H(y, -a/2) \text{ при } L_{i-1} < x \leq L_i \\ \alpha_i^П(a/2, z) \text{ при } L_{i-1} < x \leq L_i \\ \alpha_i^Л(-a/2, z) \text{ при } L_{i-1} < x \leq L_i \\ \dots \\ \alpha_n^B(y, a/2) \text{ при } L_{n-1} < x \leq L_n \\ \alpha_n^H(y, -a/2) \text{ при } L_{n-1} < x \leq L_n \\ \alpha_n^П(a/2, z) \text{ при } L_{n-1} < x \leq L_n \\ \alpha_n^Л(-a/2, z) \text{ при } L_{n-1} < x \leq L_n \end{cases} \quad (2)$$

где x – координата расчетного сечения на технологической оси ЛПА или условной технологической оси разомкнутого процесса, м; y, z – координата конкретного узла на поверхности расчетного поперечного сечения, м; a – размер грани заготовки, м; «В», «Н», «П», «Л» – указатели верхней, нижней, левой и правой граней расчетного поперечного сечения соответственно; L_1, L_2, L_i, L_n – длины характерных участков, м; n – число характерных участков.

Для задания распределения T_{cp} по поверхности расчетного сечения использован полностью аналогичный подход.

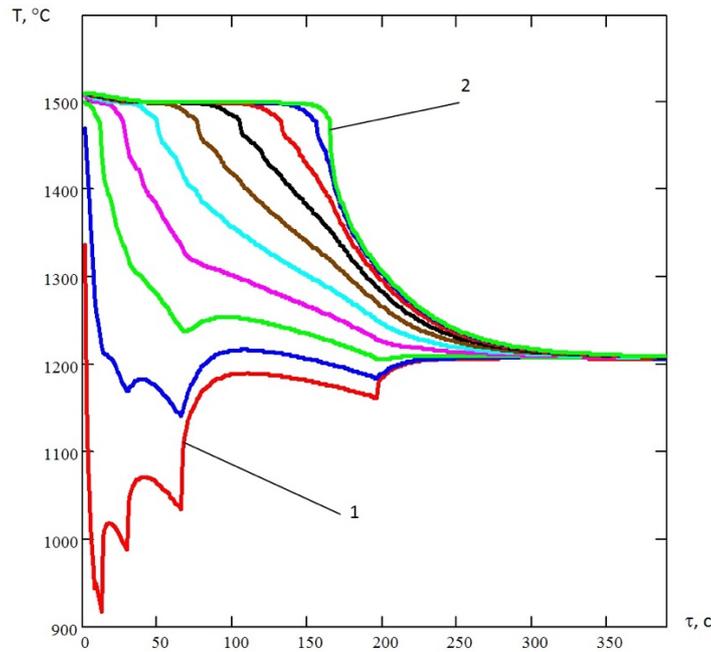


Рис. 1. Изменение температурного состояния заготовки в пределах МНЛЗ для случая разливки заготовки сечением 100x100 мм со скоростью 6.7 м/мин и последующего усреднения температурного поля:
 1 – поверхность заготовки, 2 – середина;
 остальные линии соответствуют слоям, лежащим через каждые 11,1 мм

Текущее положение расчетного сечения в зависимости от времени определяется как:

$$x(\tau) = \dots \left\{ \begin{array}{l} v_1 \cdot \tau \text{ при } \tau \leq \tau_{\text{пред}1}, \\ \text{где } \tau_{\text{пред}1} = L_1/v_1 \\ \dots \\ L_1 + v_2 \cdot (\tau - \tau_{\text{пред}1}) \\ \text{при } \tau_{\text{пред}1} < \tau \leq \tau_{\text{пред}2}, \\ \text{где } \tau_{\text{пред}2} = \tau_{\text{пред}1} + L_2/v_2 \\ \dots \\ \sum_{j=1}^{i-1} L_j + v_i \cdot (\tau - \tau_{\text{пред}i-1}) \\ \text{при } \tau_{\text{пред}i-1} < \tau \leq \tau_{\text{пред}i}, \\ \text{где } \tau_{\text{пред}i} = \tau_{\text{пред}i-1} + L_i/v_i \\ \dots \\ \sum_{j=1}^{n-1} L_j + v_n \cdot (\tau - \tau_{\text{пред}n-1}) \\ \text{при } \tau_{\text{пред}n-1} < \tau \leq \tau_{\text{пред}n}, \\ \text{где } \tau_{\text{пред}n} = \tau_{\text{пред}n-1} + L_n/v_n \end{array} \right. \quad (3)$$

где v_1, v_2, v_i, v_n – скорости движения расчетного сечения в пределах характерных участков, м/с; $\tau_{\text{пред}1}, \tau_{\text{пред}2}, \tau_{\text{пред}i}, \tau_{\text{пред}n}$ – время нахождения расчетного сечения в конечных точках соответствующих участков.

Предложенный подход напрямую используется для моделирования температурного состояния металла в рамках ЛПА, в котором все агрегаты работают в одной технологической линии, вдоль которой непрерывно передается металл.

Для случаев традиционной разомкнутой цепочки или ЛПА, использующих промежуточные накопители металла, необходимо применение ряда приемов для обеспечения возможности использования предложенного подхода:

- для МНЛЗ без обжата заготовок с жидкой сердцевиной скорость движения расчетного сечения численно равна скорости разливки;
- при наличии обжата скорость разливки суммируется с добавочной компонентой, определяемой из условия сплошности с учетом параметров обжата;
- для порезки заготовок и их нахождения на холодильнике для осмотра и ремонта, транспортировки из цеха в цех (вплоть до посадки в печь) вводится условная скорость движения $v_{\text{усл}}$ (в общем случае может быть выбрана любая величина), тогда условная длина такого участка определяется в зависимости от времени пребывания заготовки ($\tau_{\text{зад}}$) на нем, как $L_{\text{усл}} = v_{\text{усл}} \cdot \tau_{\text{зад}}$. В случае существенно отличающихся условий теплообмена после порезки заготовок и вплоть до подачи в печь можно выделить не один, а несколько условных участков.

Вопросы численной реализации и адаптации модели рассмотрены в работе [9].

Пример расчета температурного состояния заготовки сечением 100x100 мм в рамках концептуальной ЛПА в течение периода ее форми-

рования на МНЛЗ и усреднения температурного поля в печи приведен на рис. 1.

До 200 с наблюдаем формирование заготовки в МНЛЗ, а далее выравнивание температурного поля в нагревательном устройстве (в данном случае без подключения топлива).

Для расширения возможностей предложенной математической модели предложено для рассматриваемого поперечного сечения заготовки на каждом шаге по времени определять значение среднemasсовой энтальпии металла.

Эта величина определяется на основании предварительного вычисления энтальпии каждого элементарного объема поперечного сечения:

$$i = \begin{cases} Q_{кр} + T_c \cdot c_{tm}(T_c) + (t - T_l) \cdot c_{жм}(t) & \text{при } t \geq T_l \\ t \cdot c_{жм}(t) & \text{при } t \leq T_c \\ c_{tm}(T_c) + Q_{кр} \cdot \left(1 - \frac{T_l - t}{T_l - T_c}\right) & \text{при } T_c < t < T_l \end{cases}, \quad (4)$$

где c_{tm} , $c_{жм}$ – удельные массовые теплоемкости твердого и жидкого металла соответственно, Дж/(кг·К); T_l и T_c – температуры ликвидус и солидус, °С; $Q_{кр}$ – теплота кристаллизации, Дж/кг.

Тогда среднemasсовая энтальпия определяется следующим образом:

$$i_{см} = \frac{\sum_{j=2}^{n-1} \sum_{k=2}^{m-1} i_{j,k}}{(n-2) \cdot (m-2)}, \quad (5)$$

где n , m – число узлов сетки по толщине и ширине заготовки соответственно.

Использование величины среднemasсовой энтальпии позволяет путем простых выражений определять количества тепла, требуемые для доведения теплового состояния заготовок от исходного состояния до заданного:

– для движущегося потока материала (Вт):

$$Q = a \cdot b \cdot v \cdot \rho \cdot (i_{см2} - i_{см1});$$

– для отдельной заготовки (Дж):

$$Q = a \cdot b \cdot L \cdot \rho \cdot (i_{см2} - i_{см1}),$$

где $i_{см1}$, $i_{см2}$ – среднemasсовые энтальпии металла в исходном и заданном состояниях, Дж/кг; L – длина заготовки, м.

Предложенный инструментарий решает следующие задачи, нацеленные на решение типовых задач, возникающих при работе ЛПА:

1. Определение необходимого теплосодержания заготовки после МНЛЗ для прямой про-

катки без догрева (в случае, если это допускается по технологическим соображениям: непрерывнолитая заготовка заведомо не имеет дефектов, которые вызовут отбраковку прокатной продукции, поэтому осмотр и ремонт не нужны).

2. Определение рационального времени выравнивания температурного поля заготовок, обладающих после МНЛЗ достаточным запасом тепла для прокатки, на основе анализа результатов численных экспериментов.

3. Определение общего количества тепла (тепловой мощности), которое необходимо подвести к металлу для догрева заготовок, не обладающих достаточным запасом тепла.

4. Определение средней плотности теплового потока, который необходимо подводить в печном агрегате для догрева материала, при условии реализации этой операции в течение заданного промежутка времени τ_n .

5. Выбор температуры печи, которая позволяла бы достичь заданную среднюю плотность теплового потока на поверхность материала.

6. Анализ теплового состояния металла заготовок после нагрева на предмет приемлемости полученного значения теплового перепада.

Выводы

Обоснована необходимость разработки и использования прогнозных математических моделей для всех видов металлургического оборудования, в частности задействованного в производстве сортового проката. Обосновано, что возможно создание единой прогнозной модели для участка МНЛЗ – нагревательное устройство, независимо от того идет ли речь об использовании ЛПА или вообще разомкнутой технологической схеме. Для решения этой задачи рассматривается температурное состояние поперечного сечения заготовки, а перемещение между различными элементами ЛПА или разомкнутой схемы учитывается за счет смены граничных условий. Обоснована возможность значительно расширения возможностей модели за счет введения понятия среднemasсовой энтальпии поперечного сечения заготовки и разработаны приемы решения ряда важных задач с ее использованием. Этот перечень включает в себя: определение необходимого теплосодержания заготовки после МНЛЗ для прямой прокатки без догрева, определение рационального времени выравнивания температурного поля заготовок, обладающих после МНЛЗ достаточным запасом тепла для прокатки, а также определение общего количества тепла (тепловой мощности), которое необходимо подвести к металлу для догрева заготовок, не обладающих достаточным запасом тепла.

Список литературы

1. Ткаченко В.Н. Математическое моделирование, идентификация и управление технологическими процессами тепловой обработки материалов / В.Н. Ткаченко. – Т.13. – Сер. «Задачи и методы: математика, механика, кибернетика». – Киев: Наукова думка, 2008. – 244 с.
2. Иванова А.А. Математическое моделирование положения двухфазной зоны в непрерывнолитемом слитке / А.А. Иванова, А.Н. Курганский // XV Минский международный форум по тепломассообмену, Минск, 23–26 мая 2016, С. 331-334.
3. Mauder T. A fuzzy-based optimal control algorithm for a continuous casting process / T. Mauder, Ć. Šandera, J. Štětina // Materials and technology. – 2012. – Vol.46, Is.4. – P. 325-328.
4. Лукин С.В. Математическое моделирование теплового состояния заготовки квадратного сечения в сортовой МНЛЗ и в термосе / С.В. Лукин, К.Ю. Левашев, А.А. Збродов // Вестник Череповецкого государственного университета / №3.- 2018.- С.37-45
5. Predictive mathematical model of the process of metal heating in walking-beam furnaces / S.I. Ginkul, A.B. Biryukov, P.A. Gnitiev, A.A. Ivanova. // Metallurgist. 2018. – Т.62. – №1-2. – P. 15-21.
6. Коновалов Ю.В. Металлургия: учебное пособие: в 3 кн. Кн. 2 / Ю.В. Коновалов, А.А. Минаев. – Донецк: ДонНТУ, 2012. – 496 с.
7. Бирюков А.Б. Современные подходы к диагностике теплотехнических параметров работы литейно-прокатных агрегатов на участке МНЛЗ – нагревательное устройство / А.Б. Бирюков, А.А. Иванова // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2018.–№2 (1418). – С. 43-48.
8. Бирюков А.Б. Тепловые аспекты реализации совмещенных процессов разливки-прокатки / А.Б. Бирюков // Математическое моделирование. – 2012. – №1. – С. 45-49
9. Biryukov A. Modeling of heat engineering parameters of casting and rolling complexes work / A. Biryukov, A. Ivanova, // Archives of Foundry Engineering. – 2019. – 19(3). – P. 11-14.
10. Heat and mass transfer / S.I. Ginkul, V.V. Kravtsov, V.I. Sheludchenko, A.B. Biryukov. – Donetsk: Nord – Press, 2006. – 292 p.

A.B. Biryukov /Dr. Sci. (Eng.)/

Donetsk National Technical University (Donetsk)

PREDICTIVE MATHEMATICAL MODELING OF THE TEMPERATURE STATE OF METAL IN THE PRODUCTION OF LONG PRODUCTS AT THE SECTION OF CCM - HEATING DEVICE

Background. *Within the framework of section rolling production, an open circuit of interaction between the CCM and the heating device is usually used; in some cases, the principle of a casting and rolling unit is implemented. An idea arises about the possibility of describing the temperature state of the metal at the section of the CCM - heating device using a single mathematical model for any options for implementing the interaction of aggregates.*

Materials and/or methods. *The developed mathematical model is based on the consideration of the differential equation of non-stationary heat conduction in a rectangular coordinate system in a two-dimensional setting to determine the temperature state of an arbitrary cross-section of the workpiece, taking into account changes in the boundary conditions and the speed of its movement depending on the location.*

Results. *An example of determining the temperature field of metal within the framework of the LPA during casting of billets with a cross section of 100x100 mm is illustrated. A method is proposed for determining the mass-average enthalpy of a metal in the considered cross section. A list of standard tasks has been worked out that can be solved using the mass-average enthalpy value: determining the required heat content of the workpiece after CCM for direct rolling without reheating, determining the rational time for leveling the temperature field of workpieces, having a sufficient heat reserve after the CCM for rolling, as well as determining the total amount of heat (thermal power) that must be supplied to the metal to reheat billets that do not have a sufficient heat reserve.*

Conclusion. *The possibility of describing the temperature state of the metal at the section of the CCM - heating device in the production of long products on the basis of a single predictive mathematical model is substantiated. The possibilities of this model are significantly expanded due to the*

introduction of the concept of the mass-average enthalpy of the cross section of the workpiece and the development of methods for solving a number of important problems using it.

Keywords: *long products, CCM, heating device, casting and rolling unit, temperature state, predictive mathematical model.*

Сведения об авторе

А.Б. Бирюков

SPIN-код: 3186-0680

ORCID iD: 0000-0002-8146-2017

Телефон: +380 (62) 301-08-61

Эл. почта: birukov.donntu@mail.ru

Статья поступила 21.01.2022 г.

©А.Б. Бирюков, 2022

Рецензент д.т.н. Н.И. Захаров