

стали. Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Екатеринбург: УГТУ–УПИ, – 2004.

3. Лисиенко В. Г., Лаптева А. В., Чесноков Ю. Н. Сравнительный эколого-парниковый анализ альтернативных бескоксовых процессов производства чугуна и стали // *Металлург.* – 2011. – № 7.

4. Лисиенко В. Г., Розин С. Е., Щелоков Я. М. Методика расчета и использование технологических топливных чисел. *Известия вузов. Черная металлургия*, 1987. № 2. С. 108–112.

5. Лисиенко В. Г., Попов В. В. Патент на изобретение № 2337971. Способ производства стали с использованием металлизированного железорудного сырья. Приоритет от 12 марта 2007 года. Россия.

УДК 669.045

Е. В. Попов, Г. М. Дружинин

ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники» – ВНИИМТ, г. Екатеринбург, Россия

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,

Институт материаловедения и металлургии,

кафедра «Теплофизика и информатика в металлургии», г. Екатеринбург, Россия

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ НАГРЕВА МЕТАЛЛА В ТОЛКАТЕЛЬНЫХ ПЕЧАХ

Аннотация

В данной работе рассматривается разработка алгоритмов и методов расчета нагрева металла в толкательных печах с учетом переходных режимов работы для снижения неравномерности температуры по сечению заготовок и окалинообразования.

Ключевые слова: методическая печь, окалинообразование, математическая модель, термическая неоднородность, теплообмен.

Abstract

In this work development of algorithms and methods of calculation of heating of metal in pusher furnaces taking into account transitional operating modes for decrease in unevenness of temperature on the section of preparations and an scale forming is considered.

Keywords: methodical furnace, scale forming, mathematical model, thermal heterogeneity, heat exchange.

Математическая модель нагрева заготовок в методической толкательной печи представлена в следующем виде.

Определение поля температур в сечении нагреваемой заготовки при определении динамики нагрева производилось с применением численного метода конечных элементов при решении нелинейного уравнения теплопроводности

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + Q(x, y, z, t) \quad (1)$$

с учетом начального условия $T(t_0) = T_n$ при $t = 0$, а также граничных условий на поверхности заготовки:

$$\pm \lambda \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{\text{пов}} = \alpha(T_{\text{пов}} - T_S) + \sigma_\epsilon(T_{\text{пов}}^4 - T_S^4). \quad (2)$$

При повышении температуры металла до 580–620 °С углеродистая сталь претерпевает превращение исходной структуры перлита в структуру аустенита, сопровождаемое выделением теплоты L (кДж/кг). Учет выделения теплоты превращения $P \rightarrow A$ осуществляется заданием плотности источника тепла в виде

$$Q = \rho L \frac{\partial \Psi}{\partial t}. \quad (3)$$

Существенной особенностью предлагаемой математической модели является совместное решение задачи теплопроводности для нагреваемого сляба и участка опорной (глиссажной) трубы, внешняя поверхность которой теплоизолирована с целью снижения тепловых потерь. Другая особенность математической модели состоит в учете зависимости основных теплофизических свойств стали – теплопроводности и удельной теплоемкости от температуры.

Для определения истинной теплоемкости сталей различного химического состава при наличии n -го количества фазовых превращений рекомендуется пользоваться уравнением:

$$c(T) = c_0 + \sum_{i=1}^n \frac{m_i L_i}{\Delta T_i} \exp\left[-a_i^2 \left(\frac{T_{i0} - T}{T_{i0} - T_{i1}}\right)^2\right]. \quad (4)$$

Также важным теплофизическим свойством стали при нагреве является теплопроводность, зависимость которой от температуры имеет вид:

$$\lambda(T) = (\lambda_0 - \lambda_1)\{[1 - \sin^3(K_L \theta_1)] + \lambda_1\}, \quad \text{при } T < T_{m1} \quad (5)$$

$$\lambda(T) = (\lambda_2 - \lambda_1)\{[1 - \exp(-5 \cdot \theta_2^2)] + \lambda_1\}, \quad \text{при } T \geq T_{m1}. \quad (6)$$

Учет граничных условий второго рода производился по уравнению

$$n \cdot (k \nabla T) = \alpha \cdot (T_S - T) + \sigma \cdot (T_S^4 - T^4). \quad (7)$$

Плотность стали была принята как величина, не зависящая от температуры и равная $\rho = 7850$ кг/м³.

Расчет температуры блюма производился по формуле

$$\rho \cdot C_m \cdot T' - \nabla \cdot (\lambda_m \nabla T) = \alpha(T_{\text{ср}} - T) + \sigma(T_{\text{ср}}^4 - T^4). \quad (8)$$

Общеизвестно, что при движении металла в методической печи, имеющей зону нижнего нагрева, экранирование нижней поверхности заготовок подовыми устройствами (глиссажными трубами, рейтерами) приводит к образованию на заготовках зон с пониженной

температурой – так называемых «темных пятен». Возникающая при этом термическая неоднородность поля температур заготовки приводит к перегрузке валков прокатного стана и возникновению дефектов получаемого проката. На основании многочисленных экспериментов установлено, что для мало и среднеуглеродистых сталей допустимые значения параметра ΔT не должны превышать 50–60 °С.

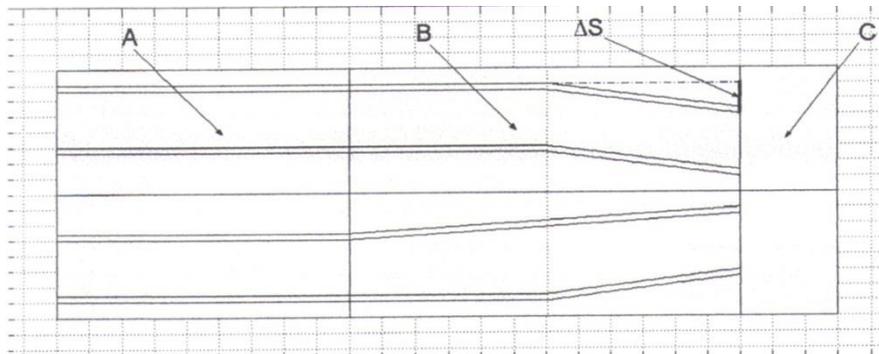


Рис. 1. Схема разводки опорных труб в методической печи:
 А – методическая зона; В – сварочная зона; С – томильная зона;
 ΔS – смещение подовых труб

Снижение термической неоднородности заготовок достигается за счет использования разводки (смещения или переноса на параллельные базовым) подовых труб на участке печи, примыкающем к монолитному поду.

Цель расчета состоит в выборе двух основных параметров: участка печи, где необходимо начать процесс разводки L_N и необходимую степень разводки ΔS . Определение данных величин осуществляется методом последовательных приближений при контроле степени термической неоднородности нагрева заготовки. При этом принимается, что заготовка перемещается в рабочем пространстве печи с неизменной скоростью $V = L_{\text{под}}/\tau$.

В результате расчета температурного поля нагреваемого сляба без учета разводки определяется длительность нагрева сляба (τ_k) и распределение температур по его сечению, удостоверяющие двум финальным условиям:

$$T_{\text{пов}} = T_{\text{пов}}^k, \Delta T = \Delta T^k.$$

Зная полную длительность нагрева сляба и длину полезного пода печи (L), можно рассчитать момент времени τ_N , соответствующий началу смещения опорных труб, по формуле

$$\tau_N = \tau_k \frac{L_N}{L}. \quad (9)$$

Текущее значение смещений опорных труб подсчитывается по формуле

$$S(\tau) = K \cdot (\tau - \tau_N), \quad (10)$$

где коэффициент скорости смещения определяется из соотношения

$$K = \frac{\Delta S}{t_k - t_N}. \quad (11)$$

Вводя смещение $S(t)$ в алгоритм решения задачи теплопроводности, можно определить поле температур в нагреваемом слябе с учетом разводки опорных труб.

Кроме того, составленная математическая модель позволяет учитывать не только изменение во времени температур нижней и верхней поверхностей сляба, но и изменение температуры на поверхности изолированной трубы. Стоит отметить, что для различных режимов нагрева графики изменения температуры на поверхности теплоизолированной глянцевой трубы (T_T) практически одинаковы: к моменту выхода нагреваемых слябов из второй сварочной зоны указанная температура достигает значений 1000°C (рис. 2).

Вопрос снижения угара металла – один из ключевых при нагреве металла, ему посвящено большое число работ. Рассмотрим методику возможного уменьшения окисления в случаях переходных режимов работы печи.

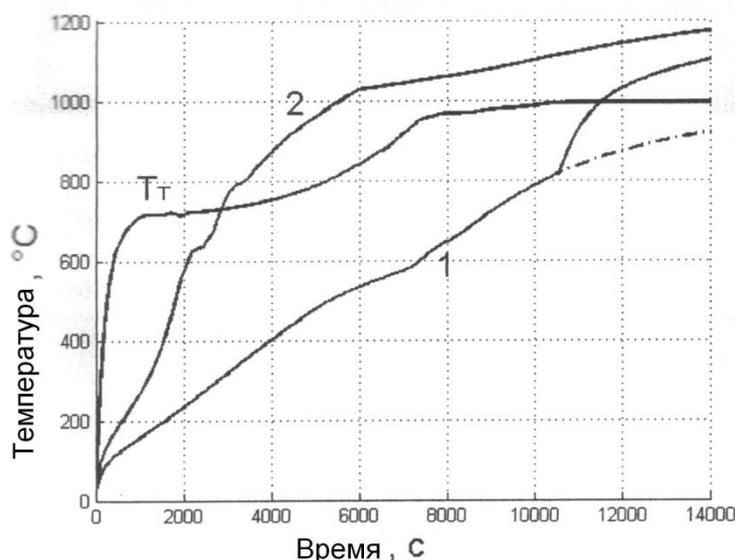


Рис. 2. Изменение во времени температур на нижней (1) и верхней (2) поверхностях сляба толщиной 240 мм; штриховая линия – при устранении монолитного пода

При расчетах процессов высокотемпературного окисления стали при нагреве или охлаждении наибольшее распространение получил закон Ю. Р. Эванса, который в дифференциальной форме записывается в виде

$$\frac{dY}{d\tau} = \frac{\chi}{Y T(\tau)} \exp\left(-\frac{B}{T(\tau)}\right), \quad (12)$$

Также применяют уравнение К. Вагнера

$$\frac{dY}{d\tau} = \frac{k_0}{2Y} \exp\left(-\frac{B}{T(\tau)}\right), \quad (13)$$

На основе законов (12) и (13) при допущении, что зависимость угара (или толщины окисленного слоя) от времени подчиняется закону квадратного корня, который отражает

диффузионный механизм окалинообразования, а температура поверхности металла постоянна во времени, можно получить соотношение

$$Y = k\sqrt{\tau}. \quad (14)$$

Значения константы скорости окисления находятся из экспериментов по определению угара металла.

Отмечается, что ближе всего действительным экспериментальным данным соответствует двучленный закон окисления

$$Y = a\sqrt{\tau} + b\tau. \quad (15)$$

Константа скорости в уравнении (14) подчиняется уравнению Аррениуса, которое можно представить в виде

$$k = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right). \quad (16)$$

Принимая $B = Q/R$, уравнение можно записать в виде

$$k = A \exp\left(-\frac{B}{T}\right). \quad (17)$$

Массу образующейся окалины можно определить из выражения (16)

$$M^2 - M_0^2 = \int_0^\tau A \exp\left(-\frac{B}{T}\right) d\tau. \quad (18)$$

В результате интегрального вычисления данного уравнения при условии нагрева окалины с постоянной скоростью можно получить выражение для определения массы окалины, образующейся при нагреве или охлаждении металла

$$M = \sqrt{M_0^2 + AB \sum_{i=1}^p \frac{\psi_i}{w_i}}. \quad (19)$$

Данный метод деления температурной кривой на интервалы с постоянной скоростью нагрева дает большую степень приближения к действительному режиму нагрева, чем известный прием разбивки на интервалы с постоянной температурой.

Считается доказанным, что зависимость скорости окисления от температуры подчиняется закону Аррениуса. В конкретных расчетах скорости окисления стали формула (17) преобразуется к виду дифференциального уравнения

$$\frac{dh}{dt} = \frac{K_0}{2h} \exp\left[-\frac{B}{T(t)}\right] \quad (20)$$

при соблюдении начального условия

$$h|_{t=t_0} = h_0 \quad (21)$$

Далее в рассмотрение вводится параметр

$$W = \frac{dh^2}{dt} = K_0 \exp\left(-\frac{B}{T}\right), \quad (22)$$

характеризующий интенсивность образования окалины, а интеграл дифференциального уравнения (20) приводится к виду

$$h_k^2 = K_0 \int_{t_0}^{t_k} \left\{ \exp\left[-\frac{B}{T_{\text{пов}}(t)}\right] \right\} dt. \quad (23)$$

Для подтверждения данной методики расчета угара металла были проведены расчеты окалинообразования в толкательной печи для нагрева заготовок рельсовых накладок ОАО «НСМЗ», которые были сопоставлены с опытными данными.

Выполнение расчета с использованием данной методики приводит к значению толщины слоя окалины накладки, равному $h = 0,29$ мм, что для одной тонны продукции будет означать угар металла, равный 0,36 % абсолютных или 3,6 кг/т.

Опыты по определению окалинообразанию показали значение угара 4,17 кг/т или 0,417 абс. %.

Результаты вышеприведенных исследований показывают, что предложенная математическая модель расчета теплообмена в печном объеме, основанная на заданных постоянных во времени и в диапазоне температур греющей среды, неадекватно описывает теплообменные процессы в печи с импульсным регулированием температуры и своеобразной газодинамикой продуктов сгорания, обусловленной применением рекуперативных горелочных устройств.

Еще одной особенностью данной модели является использование исследований С. Н. Шорина, который в своих работах перенос энергии излучения в газовом пространстве описывал на основе скорректированного уравнения теплопроводности, без использования гипотезы о постоянстве температуры газа в исследуемых объемах (пространствах).

Данный подход, по нашему мнению, позволит учесть и эффект импульсного сжигания топлива, при котором температура греющих газов на выходе из горелочных устройств может быть представлена в виде незатухающих колебаний.

Математическая формулировка о теплообмене в проходной печи базируется на рассмотрении теплового взаимодействия системы трех тел – нагреваемого металла, греющих газов и футеровки свода, пода и стен нагревательной печи.

Газовая фаза

$$\rho_2 C_2 \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda_2 \nabla T), \quad (24)$$

где коэффициент теплопроводности газа является функцией локального значения температуры и зависит от поглощающих свойств среды

$$\lambda_2 = \sigma_2 T^3 / A, \quad (25)$$

где

$$\sigma_2 = \frac{16}{3} \sigma_0 = 30,25 \cdot 10^{-8}, \quad (26)$$

$$A = A_0 \exp\left[-K_0 \left(\frac{T}{T_0} - 1\right)\right]. \quad (27)$$

Металл рельсовой накладки (с учетом выделения тепла фазового превращения перлита в аустенит в интервале температур $\Delta T = T_{S1} - T_{S2}$).

$$\rho_M C_M \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda_M \nabla T), \quad (28)$$

где принято:

$$C_M(T) = 628 + 0.2(T - 273) + \Delta C_{np} \cdot \exp \left\{ -16 \left[\frac{(T_{S1} - T)}{(T_{S1} - T_{S2})} \right]^2 \right\}, \quad (29)$$

$$\lambda_M = 0.5 \left\{ \lambda_1 - \lambda_2 \left[\frac{2F}{(F^2 - F + 1)} \right] \right\}, \quad (30)$$

где обозначено:

$$F = \frac{(T - T_0)}{(T_1 - T_0)}. \quad (31)$$

Далее приведены результаты расчета нагрева металла в толкательной печи для нагрева заготовок рельсовых накладок ОАО «НСМЗ» по данной методике.

В расчетах учитывается изменение во времени греющей среды в виде импульсной функции, ограниченной в интервале температур 900–1000 °С, при различном поведении графика греющей среды в начальной стадии нагрева (для первой зоны печи).

С этой целью используется следующее соотношение для графика изменения во времени температуры греющей среды:

$$T_G(t) = T_{G0} + [T_P(t) - T_{G0}] \cdot \left\{ 1 - \exp \left[-12 \cdot \left(\frac{t}{t_k} \right) \right] \right\}. \quad (32)$$

Результаты решения задачи теплопроводности (28)–(31) при задании температуры греющей среды соотношением (32) приведены для трех значений начальной температуры $T_{G0}^1 = 880$ °С, $T_{G0}^2 = 800$ °С и $T_{G0}^3 = 500$ °С. На рис. 3 представлен график для значения $T_{G0}^3 = 500$ °С.

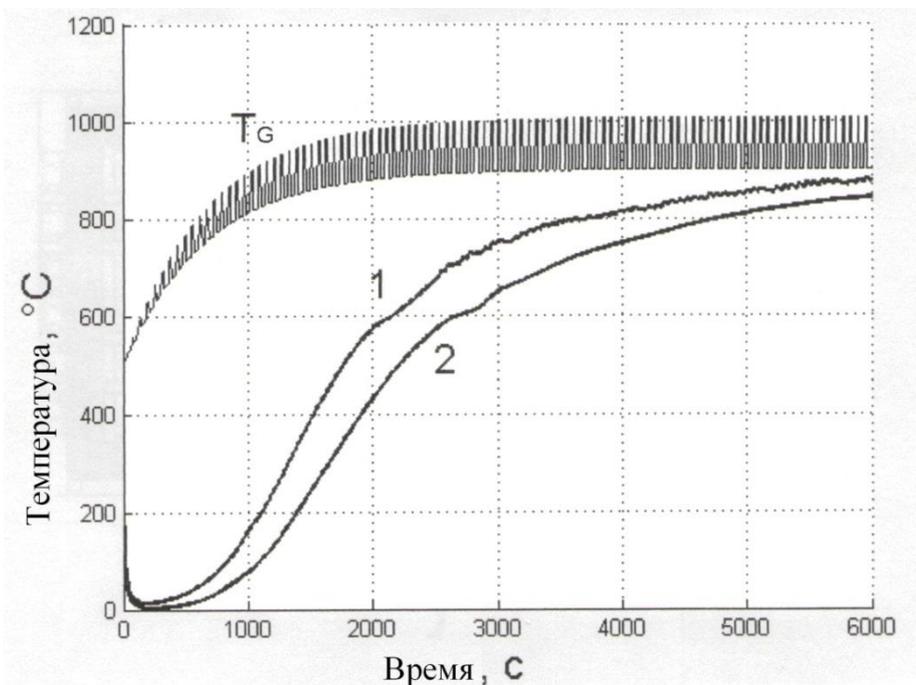


Рис. 3. Изменение во времени температуры греющих газов (T_G) и температур на верхней (1) и нижней (2) поверхностях рельсовой накладки при задании начальной температуры газа 500 °С

Таким образом, проведенные расчеты нагрева рельсовых накладок в первой зоне проходной печи подтверждаются результатами экспериментального определения температуры газов на входе заготовок в печь.

Разработанная методика определения температурного поля в газовой фазе и в металле, основанная на использовании концепции С. Н. Шорина, позволяет осуществить количественную оценку возникающей в нагреваемых заготовках термической неоднородности и оценить благоприятное воздействие рационального размещения горелочных устройств на устранение или, по крайней мере, на существенное снижение степени термической неоднородности нагреваемых заготовок.

УДК 669.36

О. В. Порох¹, Г. В. Воронов¹, А. Н. Алексеев², Р. В. Дзюбайло²

¹ ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,

Институт материаловедения и металлургии,

кафедра «Теплофизика и информатика в металлургии», г. Екатеринбург, Россия,

² ОАО «Уралэнергочермет», г. Екатеринбург, Россия

АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА С РАСПЛАВОМ МЕДИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ МЕДНОЙ КАТАНКИ

Аннотация

В статье описана технологическая схема производства медной катанки с использованием в качестве топлива природного газа. При таком способе производства медной катанки периодически возникают неконтролируемые изменения качества меди по содержанию кислорода и водорода. Для анализа этой проблемы была предложена модель-схема возможных основных реакций массообмена между расплавом меди и газовой фазой над расплавом. Рассмотрены зависимости констант равновесия реакций $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \leftrightarrow 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$, $2\text{CO} + \text{O}_2 \leftrightarrow 2\text{CO}_2$, протекающих в газовой фазе над расплавом меди. Предложено уточнить методику расчета состава исходного природного газа с учетом его влагосодержания (d , г/м³ сухого газа). Разработан алгоритм расчета горения природного газа с введением поправок на диссоциацию $\{\text{CO}_2\}$ и $\{\text{H}_2\text{O}\}$. Проведены расчеты и построены графики зависимости содержания водяного пара и диоксида углерода, с учетом их диссоциации и концентрации в продуктах сгорания природного газа, от температуры и коэффициента расхода воздуха.

Ключевые слова: медь, медная катанка, степень диссоциации, реакция диссоциации.

Abstract

The article describes the technological scheme of production of copper wire rod, using natural gas as fuel. By using this method of production of copper rod uncontrolled changes of oxygen