

**Э. Н. Шебаниц, А. К. Харин, Б. В. Изотов, А. И. Лаштун, А. А. Вахтин**

ПАО «Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича», Группа Метинвест

## **Особенности математического моделирования нагрева стальных слитков перед прокаткой**

*Представлены математические модели процессов при предпрокатной подготовке слябинговых слитков с учетом анизотропии температурного поля в ячейке нагревательного колодца, а также образования окалины и ее возможного оплавления. Эти модели реализованы в виде компьютерной программы, с помощью которой разработан новый энергоресурсосберегающий режим нагрева слитков.*

**Ключевые слова:** нагревательный колодец, стальной слиток, нагрев перед прокаткой, математическая модель, оплавление окалины, анизотропия температурного поля

**В**ведение. Для совершенствования технологических процессов предпрокатной подготовки слитков нередко используют математическое моделирование [1, 2, 4]. Целесообразность данного подхода обусловлена возможностью значительно снизить количество промышленных экспериментов, сократить продолжительность и стоимость разработки новых технологий. Качество исследований во многом определяется точностью модели, которая зависит от совокупности учитываемых физических закономерностей. Принятые допущения частично компенсируются адаптационными (настроечными) коэффициентами.

В известных математических моделях процесса нагрева слитков в нагревательных колодцах [1] не учитывали некоторые физические процессы (явления), например: оплавление окалины с поверхности слитков; анизотропию температуры дымовых газов по объему рабочего пространства и др. Из-за этого увеличивалась погрешность расчета температурного состояния слитка и, особенно, угара металла. Оплавление окалины – нежелательный процесс, приводящий не только к увеличению угара, но и ухудшению качества проката, а также усложнению операций по удалению шлака с подины. Математическая модель нагрева слитков с учетом оплавления окалины позволяет разрабатывать технологические приемы тепловой обработки слитков, сводящие к минимуму не только оплавление окалины, но и отрицательные последствия этого процесса.

Распространенным способом улучшения технико-экономических показателей работы обжимных станов является ускоренная передача слитков из сталеплавильных цехов, поэтому исследование тепловых процессов в слитках с наличием жидкой фазы – обязательное условие для модели.

**Цель и задачи работы** – разработка и адаптация комплексной математической модели теплофизических процессов при предпрокатной подготовке слябинговых слитков (включая их охлаждение в изложнице и на воздухе, нагрев в нагревательном колодце с центральной горелкой) с учетом образования и оплавления окалины, а также анизотропии

температуры дымовых газов по рабочему пространству печи; проведение исследований и разработка технических предложений по уменьшению затрат топлива и повышению качества нагрева слитков с жидкой сердцевиной под прямую («транзитную») прокатку.

При этом ставили задачу обеспечить: долю двухфазной составляющей в слитке на выдаче из колодца не более 5 %; энтальпию, достаточную для прокатки слитка «транзитом» на лист толщиной 1,8-8,0 мм; малый перепад температуры поверхности слитка по высоте (не более 40 °С); уменьшение или исключение оплавления окалины в процессе нагрева.

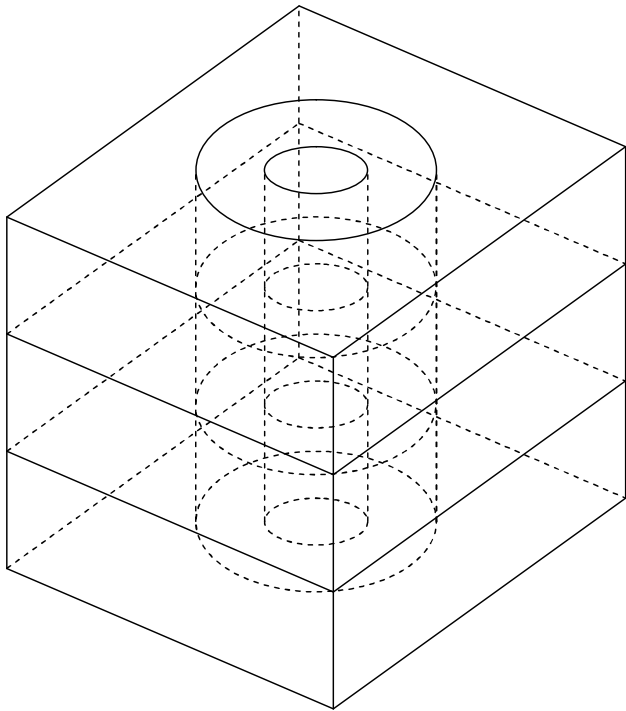
### **Структура комплексной математической модели**

Комплексная математическая модель представляет собой совокупность моделей, имитирующих процессы теплообмена на основе решения дифференциальных уравнений в частных производных для систем:

- жидкая струя металла – расплав металла с переменной глубиной – изложница – окружающая среда;
- расплав металла – изложница – окружающая среда;
- слиток – окружающая среда;
- факел – дымовые газы – кладка печи – окружающая среда;
- слитки – смесь дымовых газов с воздухом, проникшим в колодец при посадке слитков – кладка печи;
- факел – дымовые газы – слитки – кладка печи – окружающая среда;
- слитки – смесь дымовых газов с воздухом, проникшим в колодец при выдаче слитков.

Внутренний объем ячейки нагревательного колодца разбивается на девять расчетных объемных элементов (рис. 1).

При построении физической модели нагревательного колодца приняты допущения и упрощения. Сложная форма рабочего пространства представ-

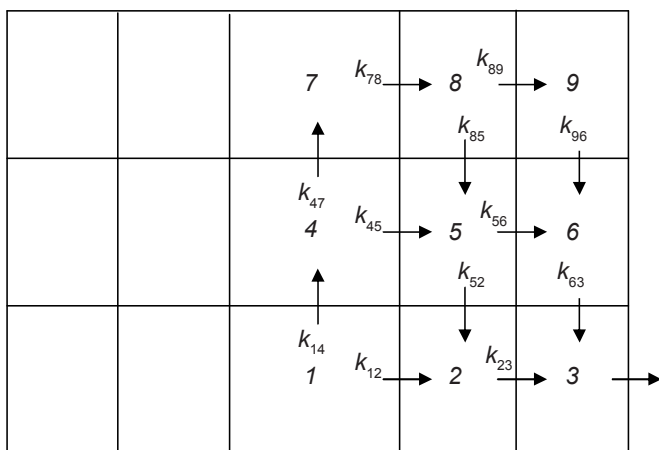


**Рис. 1.** Схема разбиения внутреннего пространства нагревательного колодца на расчетные элементы

лена в виде параллелепипеда; область факелацилиндра с диаметром, равным удвоенному диаметру горловины горелки и высотой, равной высоте ячейки. Модель горения топлива упрощенно представлена как процесс выделения теплоты и газовых продуктов сгорания в объеме факела. Коэффициенты распределения доли сгораемого топлива по расчетным объемным элементам определяли с помощью эмпирических уравнений (1) в зависимости от расхода газообразного топлива  $V$  ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ) и давления в нагревательном колодце  $P$  (Па).

$$\left. \begin{aligned} e_7 &= 0,082 + 9,551 \cdot 10^{-5}V - 1,281 \cdot 10^{-8}V^2 + \\ &\quad + 1,35 / (P + 19,6); \\ e_4 &= 0,152 + 7,846 \cdot 10^{-5}V - 1,820 \cdot 10^{-8}V^2 + \\ &\quad + 3,21 / (P + 19,6); \\ e_1 &= 1 - e_7 - e_4 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $e_7$ ,  $e_4$ ,  $e_1$  – коэффициенты распределения доли сгораемого топлива по расчетным объемам факела 7, 4, 1 (рис. 2).



**Рис. 2.** Схема движения газовых продуктов сгорания в нагревательном колодце:  $k_{ij}$  коэффициенты распределения потоков продуктов сгорания по направлениям движения

Тепломассообмен в жидкой сердцевине слитка представлен полной системой уравнений Навье-Стокса и уравнением энергетического баланса [2]. Двухфазная зона металла показана в виде известной модели кристаллизации Борисова [3]. Теплообмен в твердой части слитка и кладке нагревательного колодца описан уравнением теплопроводности [4], а теплообмен между поверхностями всех элементов системы – уравнениями зонального лучистого и конвективного теплообмена [5].

### Особенности моделирования движения газов в нагревательном колодце

При расчете процессов нагрева слитков учитывали анизотропию температурного поля по рабочему пространству нагревательного колодца. Схема движения газовых продуктов сгорания в нагревательном колодце показана на рис. 2.

Составляющие тепловых потоков, обусловленные массопереносом, определяют через средние скорости движения продуктов сгорания в сечениях нагревательного колодца с учетом их массового баланса для выделенных объемов.

Коэффициенты распределения потоков продуктов сгорания по направлениям движения ( $k_{ij}$ ) вычисляют по эмпирическим формулам (2). При адаптации модели к реальным условиям работы нагревательного колодца эти коэффициенты уточняли согласно результатам исследований температурного поля [6]:

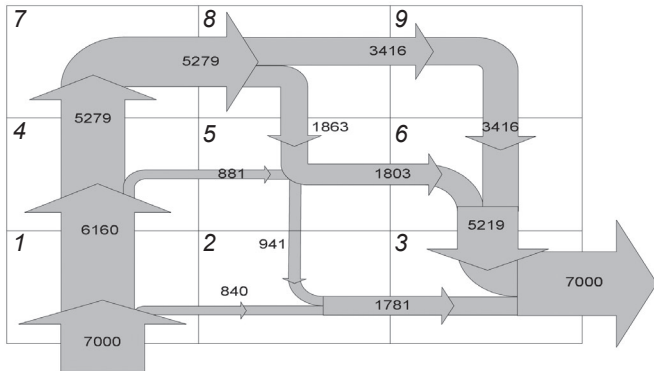
$$\begin{aligned} k_{14} &= 0,184 + 4,534 \cdot 10^{-4}V - 9,342 \cdot 10^{-8}V^2 + \\ &\quad + 4,31 / (P + 19,6); \\ k_{12} &= 1 - k_{14}, k_{23} = 1; \\ k_{47} &= 0,172 + 4,696 \cdot 10^{-4}V - 9,857 \cdot 10^{-8}V^2 + \\ &\quad + 3,74 / (P + 19,6); \\ k_{45} &= 1 - k_{47}, k_{63} = 1; \\ k_{52} &= 0,082 + 2,136 \cdot 10^{-4}V - 5,105 \cdot 10^{-8}V^2 + \\ &\quad + 1,35 / (P + 19,6); \\ k_{56} &= 1 - k_{52}, k_{78} = 1; \\ k_{85} &= 0,098 + 1,772 \cdot 10^{-4}V - 3,956 \cdot 10^{-8}V^2 + \\ &\quad + 1,75 / (P + 19,6); \\ k_{89} &= 1 - k_{85}, k_{96} = 1. \end{aligned} \quad (2)$$

Схема движения печных газов для периодов подъема температуры до контрольного значения и термостатической выдержки показана на рис. 3, а, б.

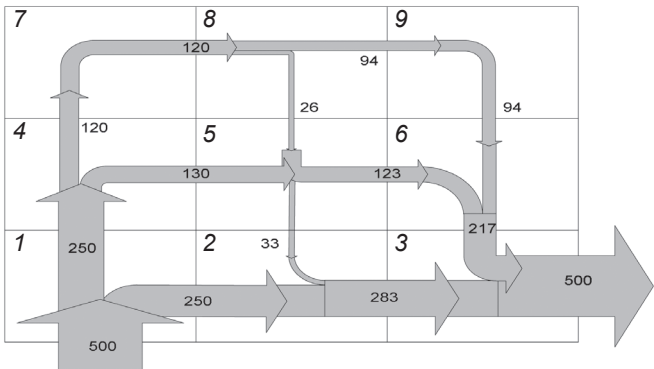
Варьируя последовательностью и продолжительностью различных периодов нагрева можно управлять температурным полем нагревательного колодца и, в значительной степени, слитка.

### Особенности математического моделирования процессов образования и оплавления окалины

В известных к настоящему времени моделях процесса образования окалины не учитывают процессы ее оплавления и стекания. Полная модель, с учетом оплавления окалины, позволит более точно рассчитывать распределение температуры на поверхности слитков и температуру в колодце, при которой происходит оплавление окалины. Для расчета угара металла разработана математическая модель, за основу которой взяли модели процессов образования



а



б

**Рис. 3.** Схема движения печных газов в нагревательном колодце для периода: подъема температуры до контрольного значения – расход смешанного газа  $V_{\text{см}} = 2500 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; давление в рабочем пространстве  $P = 9,8 \text{ Па}$  (а); термостатической выдержки – расход смешанного газа  $V_{\text{см}} = 500 \text{ м}^3/\text{ч}$ ; давление в рабочем пространстве  $P = 24,5 \text{ Па}$  (б); цифрами 1-9 указаны номера расчетных объемов; числами от 33 до 7000 – расход печных газов при нормальных условиях,  $\text{м}^3/\text{ч}$

окалины и оплавления металла, описанные в [7, 8]. В [8] показано, что закон нарастания слоя окалины химическим путем близок к параболической зависимости и, если толщина окисленного слоя составляет  $\delta_1$  при времени нагрева  $t_1$ , то при времени нагрева  $t_2$  до той же температуры толщина окисленного слоя  $\delta_2$  будет равна

$$\delta_2 = \delta_1 / (t_1 / t_2)^{1/2}. \quad (3)$$

В соответствии с (3) процесс образования окалины на слитках в нагревательном колодце можно описать выражением

$$\delta = A \sqrt{t}, \quad (4)$$

где  $A = \delta_1 / \sqrt{t_1}$  – коэффициент, зависящий от температуры в колодце и состава продуктов сгорания топлива.

Построение модели осуществлено с использованием метода контрольного объема путем условного разделения слитка на элементарные объемы, а поверхности слитка – на элементарные площадки. Для простоты рассмотрим двумерное представление модели, которую можно обобщить для трех измерений. На рис. 4 изображена часть слоев элементарных объемов слитка, примыкающих к боковой поверхности, на которой образовалась окалина с толщиной  $\delta_j$ . Индексами  $i$  обозначены номера элементарных объемов в слое, индексами  $j$  – номера слоев, а индексами  $k$  – номера интервалов времени, соответствующих шагам расчета.

Дискретный аналог дифференциального урав-

нения теплопроводности, который при применении метода контрольного объема описывает тепловой баланс в элементе окалины на границе с металлом, имеет вид

$$\left[ \left( \lambda_o \cdot \frac{T_{i+1j} - T_{ij}}{2 \cdot \Delta x_{2j}} - \lambda \cdot \frac{T_{ij} - T_{i-1j}}{\Delta x_{1j} + \Delta x_{2j}} \right) \cdot 2 \cdot \Delta y + \lambda_o \cdot \frac{T_{ij+1} - 2 \cdot T_{ij} + T_{ij-1}}{2 \cdot \Delta y} \cdot 2 \cdot \Delta x_{2j} \right] \cdot \Delta t = \quad (5)$$

$$= \rho_o \cdot \left\{ c_o \cdot (T_{ij} - T_{ij}^o) + L_{\text{пл}} \right\} \cdot 2 \cdot \Delta x_{2j} - L_o \cdot \Delta \delta_j \cdot 2 \cdot \Delta y.$$

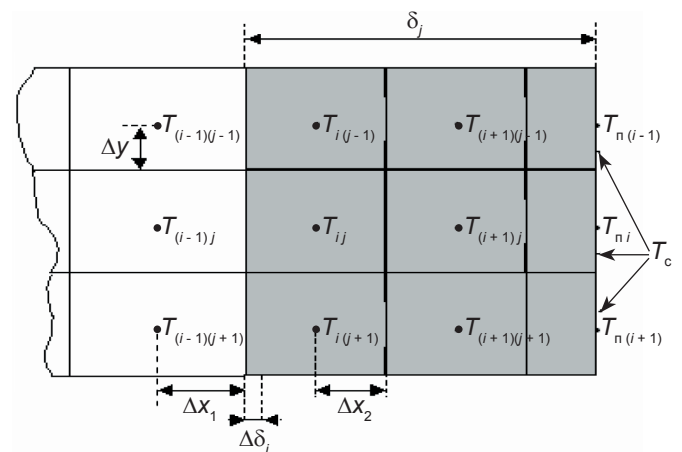
Уравнение теплового баланса для внутренних элементов окалины:

$$\left[ \left( -\lambda_o \cdot \frac{T_{i+1j} - T_{ij}}{2 \cdot \Delta x_{2j}} + \lambda_o \cdot \frac{T_{i+2j} - T_{i+1j}}{2 \cdot \Delta x_{2j}} \right) \cdot 2 \cdot \Delta y + \lambda_o \cdot \frac{T_{i+1j+1} - 2 \cdot T_{i+1j} + T_{i+1j-1}}{2 \cdot \Delta y} \cdot 2 \cdot \Delta x_{2j} \right] \cdot \Delta t = \rho_o \cdot \left[ c_o \cdot (T_{i+1j} - T_{i+1j}^o) + L_{\text{пл}} \right] \cdot 4 \cdot \Delta x_{2j} \cdot \Delta y. \quad (6)$$

Уравнение теплового баланса для элемента окалины на поверхности слитка:

$$\left[ \lambda_o \cdot \frac{T_{i+1j} - T_{\text{П}j}}{2 \cdot \Delta x_{2j}} + C \cdot (T_c^4 - T_{\text{П}j}^4) + \alpha \cdot (T_c - T_{\text{П}j}) \right] \cdot \Delta y + \lambda_o \cdot \frac{T_{\text{П}j+1} - 2 \cdot T_{\text{П}j} + T_{\text{П}j-1}}{2 \cdot \Delta y} \cdot \Delta x_{2j} \cdot \Delta t = \rho_o \cdot \left[ c_o \cdot (T_{\text{П}j} - T_{\text{П}j}^o) + L_{\text{пл}} \right] \cdot 2 \cdot \Delta x_{2j} \cdot \Delta y, \quad (7)$$

где  $\lambda = (\Delta x_{1j} + \Delta x_{2j}) / (\Delta x_{1j} / \lambda_{\text{ст}} + \Delta x_{2j} / \lambda_o)$ ,  $\lambda_{\text{ст}}$  – теплопроводность стали;  $T_{\text{П}j}$  – температура поверхности объема окалины;  $T_{ij}$  – температура элементарного объема слитка;  $\lambda_o$  – теплопроводность окалины;  $C$  – приведенный коэффициент лучеиспускания поверхности окалины;  $\alpha$  – коэффициент конвективной теплоотдачи;  $L_{\text{пл}}$  – теплота плавления окалины;  $T_{\text{пл}}$  – температура плавления окалины.



**Рис. 4.** Расчетная схема модели образования и оплавления окалины;  $T_c$  – температура греющей среды

Алгоритм расчета образования, оплавления и стекания окалины можно представить следующим образом. На каждом шаге расчета определяют температуру элементарных объемов металла и окалины. Расчет величины образовавшейся окалины в элементарных слоях слитков с учетом стекания расплавленной окалины с верхних слоев осуществляют согласно выражению

$$\delta_j^{k+1} = \frac{\delta_j^k}{\sqrt{t_{kj} + \Delta t}} + \sum_{m=i_{j-n}}^{i\Pi_{j-n}} \Delta x_{m,j-n} - \sum_{m=i_j}^{i\Pi_j} \Delta x_{m,j}, \quad (8)$$

где  $t_{kj}$  – расчетное время формирования слоя окалины  $\delta_j^k$  к моменту времени  $k\Delta t$ , которое определяют согласно выражению

$$t_{kj} = (\delta_j^k)^2 / A^2, \quad (9)$$

$\Delta t$  – шаг расчета по времени;  $n$  – дискретная скорость стекания окалины;  $n = (v\Delta t) / \Delta y$ ;  $v$  – скорость стекания окалины; номера элементарного объема окалины:  $i_{j-n}$  (прилежит к поверхности металла в слое с номером  $j-n$ );  $i_j$  (прилежит к поверхности металла в слое с номером  $j$ );  $i\Pi_{j-n}$  (прилежит к поверхности слитка в слое с номером  $j-n$ );  $i\Pi_j$  (прилежит к поверхности слитка в слое с номером  $j$ ).

$$\begin{aligned} \Delta x_{m,j} &= 0, & \text{если } T_{m,j} < T_{\text{нп}}; \\ \Delta x_{m,j} &= 2\Delta x_2, & \text{если } T_{m,j} \geq T_{\text{нп}} \text{ и } m < i\Pi_j; \\ \Delta x_{m,j} &= \Delta x_2, & \text{если } T_{m,j} \geq T_{\text{нп}} \text{ и } m = i\Pi_j. \end{aligned}$$

После подстановки выражения (9) в (8) получим

$$\delta_j^{k+1} = \sqrt{(\delta_j^k)^2 + A^2 \cdot \Delta t + \sum_{m=i_{j-n}}^{i\Pi_{j-n}} \Delta x_{m,j-n} - \sum_{m=i_j}^{i\Pi_j} \Delta x_{m,j}}. \quad (10)$$

Скорость образования окалины химическим путем в  $j$ -ом слое

$$\frac{d\delta_j^k}{dt} = \frac{A^2}{2 \cdot \delta_j^k}. \quad (11)$$

Учитывая (11), из (8) и (10) получают соотношение для расчета образования окалины

$$\delta_j^{k+1} = \delta_j^k + \frac{A^2 \cdot \Delta t}{2 \cdot \delta_j^k} + \sum_{m=i_{j-n}}^{i\Pi_{j-n}} \Delta x_{m,j-n} - \sum_{m=i_j}^{i\Pi_j} \Delta x_{m,j}. \quad (12)$$

Уравнения (5)-(12) представляют собой математическую модель образования, оплавления и стекания окалины.

В некоторых случаях полностью исключить оплавление слитков невозможно. Например, при «пересиживании» (задержке выдачи нагретого металла) или нагреве холодного всада, когда толщина образовавшейся окалины и ее тепловое сопротивление достаточно велики, температура, необходимая для нагрева слитков, может превысить температуру плавления окалины.

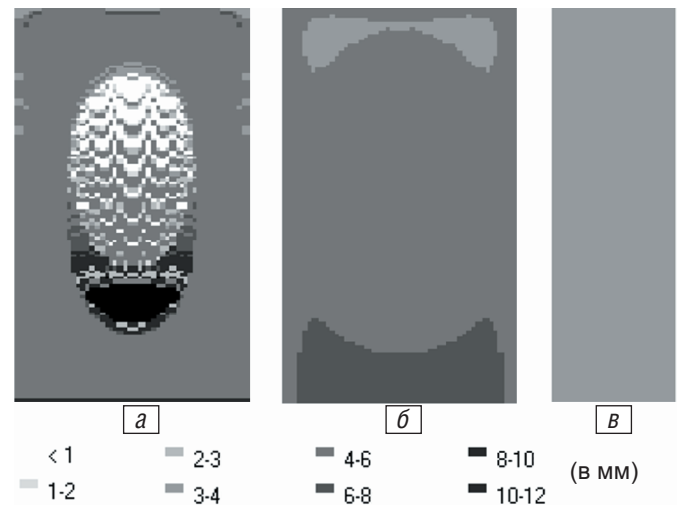
Довольно часто происходит локальное оплавление окалины, связанное с чрезмерно близким рас-

положением слитков к факелу или особенностями температурного поля слитков с жидкой сердцевинной.

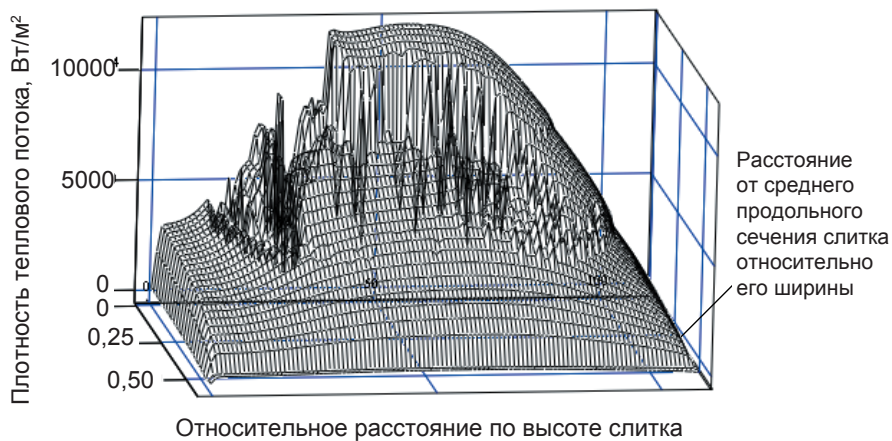
В результате исследований установлено, что процесс оплавления окалины начинается при температуре в контрольной точке нагревательного колодца (место установки стакана стационарного пирометра) 1320-1330 °С. Оплавление слитков с температурой посадки 980-1045 °С начинается с центральной части широкой грани, что связано с выделением теплоты жидкой фазы, а слитков более низких температур посада – с верхних углов и ребер. Распределение толщины окалины по поверхности слитка с температурой посадки 980 °С при нагреве до температуры нагревательного колодца 1330 °С в течение 3,5 ч с частичным оплавлением окалины показано на рис. 5. Во время оплавления окалины со слитков ее толщина на их поверхности может изменяться в пределах 0-30 мм.

На рис. 6, а показано рассчитанное с помощью описанной модели распределение плотности теплового потока по поверхности большей грани слитка, обращенной к факелу, при «пересиживании» в течение четырех часов и оплавлении 49 % его поверхности. На рис. 6, б приведены результаты аналогичного расчета, полученные с помощью упрощенной модели без учета оплавления окалины. На рис. 6, а, б представлены половины поверхности большой грани слитков (ввиду симметрии относительно продольной оси).

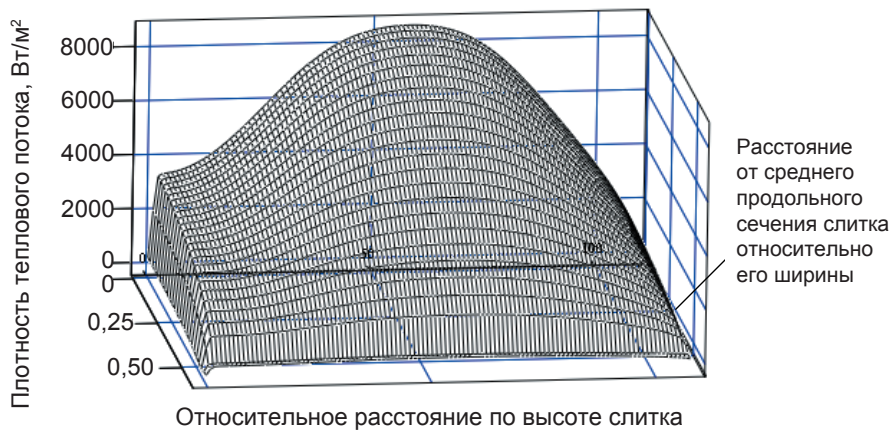
Из сравнения этих результатов видно, что неучет дополнительного изменения толщины окалины по поверхности слитков, обусловленного оплавлением окалины, может привести к существенному увеличению погрешности расчета процессов их нагрева. Упрощенная модель не позволяет учесть подобные эффекты. Разработанная модель позволяет рассчитать площадь оплавления, неравномерность толщины окалины, температур и тепловых потоков на поверхности слитков с учетом оплавления окалины. С помощью численных исследований на



**Рис. 5.** Распределения толщины окалины по поверхности слитка с температурой посадки 980 °С в случае нагрева до температуры нагревательного колодца 1330 °С в течение 3,5 ч с частичным оплавлением окалины: широкая грань слитка, обращенная к факелу (а); широкая грань слитка, обращенная к футеровке (б); узкая грань слитка (в)



а



б

**Рис. 6.** Результаты расчета распределения плотности теплового потока на поверхности большей грани слитка: с учетом оплавления окалины (а); без учета (б)

модели можно разрабатывать технологические режимы, сводящие к минимуму не только оплавление окалины, но и отрицательные последствия этого процесса».

Описанная комплексная математическая модель позволяет имитировать изменение теплотехнических параметров слитка в каждый период технологических операций от разливки до выдачи в прокат, а также на основе мгновенного теплового баланса рассчитывать расход топлива, необходимый для нагрева садки. Компьютерная программа предусматривает имитацию практически любых возможных вариантов технологии нагрева.

#### Адаптация математической модели

Отладку и адаптацию программы производили по данным нагрева слитков в нагревательных колодцах цеха ЛПЦ-1700 ММК им. Ильича, входящего в Группу Метинвест. Основными адаптационными параметрами являются: падение температуры в колодце после прекращения подачи газа для нагрева слитков –  $dT_{15}$  (за 15 мин),  $dT_{60}$  (за 60 мин);  $T_{под}$  – время подъема температуры в колодце до контрольной температуры;  $\Delta T_{выс}$  – перепад температуры по высоте колодца;  $S_{ок}(h)$  – толщина окалины по высоте слитка.

При адаптации программы произвели большое количество расчетов по фактическим результатам нагрева.

После адаптации расхождение между результатами расчетов и данными нагрева по температуре в контрольной точке нагревательного колодца и расходу топлива не превышает 3 %.

#### Совершенствование технологического процесса

С помощью компьютерной программы разработан и введен новый режим нагрева слитков с температурой поверхности при посадке 1010-1045 °С, который последовательно включает в себя выдержку без подачи газа в течение 30 мин, нагрев слитков до температуры в нагревательном колодце 1280-1320 °С, а затем термостатирование. Согласно расчетным данным при переходе на новый режим нагрева должны уменьшиться: удельный расход условного топлива – на 2 кг/т всада; разность температур по высоте слитка – на 3 °С; угар металла – на 0,23 %; доля поверхности слитков с оплавленной окалиной – на 2,1 %; доля двухфазной составляющей – на 1 %.

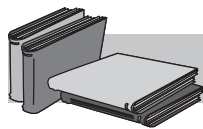
После внедрения нового режима нагрева фактическая экономия топлива для слитков с температурой посадки 1010 °С и выше составила 2,2 кг/т всада; доля оплавленных слитков, создавших при прокатке дефект «рванина», снизилась в 3,9 раза; образовавшихся вздутия слябов – в 2 раза. Достигнутый удельный расход условного топлива на нагрев слитков с жидкой сердцевиной менее 8 кг/т является лучшим показателем для подобных процессов, что в совокупности с транзитной прокаткой выводит тонколистовое производство ММК им. Ильича на лидирующие позиции в области повышения эффективности использования топлива.

#### Выводы

1. Разработаны математические модели и компьютерная программа для моделирования процессов разливки, кристаллизации и нагрева слитка в нагревательном колодце с учетом анизотропии температурного поля по рабочему пространству ячейки, образования окалины и ее возможного оплавления.
2. На основе фактических данных произведена адаптация компьютерной программы для процессов нагрева слитков в реальных нагревательных колодцах. После адаптации расхождение между результатами расчетов и данными нагрева по температуре в контрольной точке нагревательного колодца и расходу топлива не превышает 3 %.
3. Для слитков с температурой посадки выше 1010 °С разработан новый технологический процесс нагрева с начальной выдержкой без газа в течение

30 мин последующим нагревом до температуры 1280-1320 °С в нагревательном колодце и термостатированием. Этот процесс имеет улучшенные технико-экономические показатели и позволяет уменьшить расход условного топлива на нагрев металла не менее чем на 2 кг/т всада.

4. Дальнейшее направление исследований может быть связано с моделированием макро- и микро-структуры слитка как на стадии разлива и охлаждения, так и в процессе тепловой обработки в нагревательных колодцах с целью уменьшения отсортировки листового проката по поверхностным дефектам.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Моделирование технологических процессов при подготовке слитков к прокатке / Э. Н. Шебаниц, В. М. Педтиев, А. А. Федюкин и др. // *Металл и литье Украины*. – 2000. – № 9-10. – С. 9-12.
2. *Ши Д.* Численные методы в задачах теплообмена. – М.: Мир, 1988. – 544 с.
3. *Борисов В. Т., Виноградов В. В., Тяжелникова И. Л.* Современное состояние теории квазиравновесной зоны и ее применение к затвердеванию расплавов // *Оптимизация теплофизических процессов литья*. – Киев: АН УССР, 1977. – С. 32-50.
4. *Патанкар С.* Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 237 с.
5. *Ключников А. Д., Кузьмин В. Н., Попов С. К.* Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 176 с.
6. Отчет по НИР согл. договору № 1742 от 24.02.2005 г. между ПГТУ и ОАО «ММК им. Ильича» «Разработка и внедрение технических предложений по совершенствованию теплотехнологии нагрева слитков в нагревательных колодцах слябинга – 1150». – Мариуполь, 2006. – 122 с.
7. *Металлургическая теплотехника / В. А. Кривандин, В. А. Арутюнов, Б. С. Матрюков и др.* – М.: Металлургия, 1986. – 424 с.
8. *Темлянец М. В., Михайленко Ю. Е.* Окисление и обезуглероживание стали в процессах нагрева под обработку давлением. – М.: Теплотехник, 2006. – 200 с.

### Анотація

*Шебаниць Е. М., Харін А. К., Ізотов Б. В., Лаштун А. І., Вахтін А. А.*

**Особливості математичного моделювання нагріву сталевих зливків перед прокаткою**

*Представлено математичні моделі процесів при передпрокатній підготовці слябінгових зливків із врахуванням анізотропії температурного поля в осередку нагрівального колодця, а також утворення окалини та її можливого оплавлення. Ці моделі реалізовано у вигляді комп'ютерної програми, за допомогою якої розроблено новий енергоресурсозберігаючий режим нагріву зливків.*

### Ключові слова

*нагрівальний колодязь, сталевий зливков, нагрівання перед прокаткою, математична модель, оплавлення окалини, анізотропія температурного поля*

### Summary

*Shebanits E., Harin A., Izotov B., Lashtun A., Vahtin A.*

**Peculiarities of mathematical modelling for steel ingots heating before rolling**

*Mathematical models of before rolling slab-mill ingots preparation processes with a glance to temperature field anisotropy in the soaking pit chamber, and to scale formation and its probable fusion are presented. These models are realized in the form of computer program, by the instrumentality of which new energy resources saving mode for ingots heating has been developed.*

### Keywords

*soaking pit, steel ingot, heating before rolling, mathematical model, scale fusion, temperature field anisotropy*