

УДК 662.61:66.041

Качан Ю.Г., Николенко А.В., Степкин В.В.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАГРЕВА МЕТАЛЛА
В МЕТОДИЧЕСКОЙ ПЕЧИ**

Качество нагрева металла имеет важное значение, так как от этого зависят и качество конечной продукции, и эффективность работы прокатного (кузнечного) оборудования. Время нагрева, является важным фактором рассматриваемой технологии. Нагрев металла в методической печи проводят в атмосфере продуктов сгорания топлива. При этом происходит взаимодействие окружающих металл газов с железом, что приводит к окислению и обезуглероживанию его поверхности.

Из-за окисления при каждом последующем нагреве возникают потери металла. Обезуглероживание поверхностного слоя металла ухудшает механические свойства стали, понижая ее пределы прочности, текучести и выносливости.

Предлагаемый алгоритм расчета нагрева металла позволит: при заданном режиме нагрева вычислять оптимальное время пребывания металла в каждой зоне печи с учетом факторов окисления и обезуглероживания; обеспечить требуемую температуру металла на разгрузочной стороне печи; определять перепад температуры по сечению металла на выходе из печи.

В работе [3] решающим фактором, для достижения экономии газа, является определение порога достаточности нахождения металла в томильной зоне для обеспечения его качественного нагрева. Здесь критерием является заданная величина перепада температур между осевой зоной заготовки и ее поверхностью.

Блок-схема алгоритма расчета нагрева металла в методической печи с шагающими балками изображена на рис. 1. В ней используются следующие исходные данные: массив зависимости теплосодержания $m_{тн}[i]$ и теплопроводности $m_{\lambda c}[i]$ стали от температуры $m_{tc}[i]$; ограничение на перепад температуры по сечению сляба в конце зоны нагрева $\Delta t \leq 50$ °С; массив температур поверхности металла (от двух пирометров со стороны загрузки и разгрузки печи $m_{тп}[j] = [m_{тп}[1]; m_{тп}[2]]$); ограничение на температуру металла в конце нагрева $m_{тп}[2] \leq 1250$ °С; геометрические размеры нагреваемых слябов S_a, M_a (замеры выполняются двумя телеметрами со стороны загрузки); эмпирические коэффициенты (коэффициент несимметричности двухстороннего нагрева μ ; теплоемкость окалины $C_{1\epsilon}$; количество окалины Fe_3O_4 , образующейся при окислении 1 кг железа Fe m ; угар металла δ ; производительность печи G ; массив табличных коэффициентов для расчета нагрева металла $m_{Bi}[k], m_{\delta_2}[k], m_p[k], m_M[k], m_N[k]$; данные из алгоритмов процесса горения топлива и внешнего теплообмена в рабочем пространстве печи [4, 5].

Рассматриваемый алгоритм расчета нагрева металла состоит из следующих вычислительных блоков:

1. Блок расчета средней температуры металла в конце томильной зоны, с выполнением расчета температур сляба по его сечению и определением перепада указанных температур А1-В1.

1.1. Расчет коэффициента теплоотдачи в томильной зоне;

$$a_0 = \delta_5 \cdot \left[\frac{\left(\frac{t_{\text{а}5} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{m_{t_i} [t_{i2}] + 273}{100} \right)^4}{t_{\text{а}5} - m_{t_i} [t_{i2}]} \right], \quad (1)$$

где δ_5 – приведенный коэффициент излучения от газа и кладки на металл в томильной зоне (см. ф. 8 [5]); $t_{\text{а}5}$ – расчетная температура в томильной зоне (см. ф. 11 [4]); $m_{t_i} [t_{i2}]$ – разгрузочная температура металла.

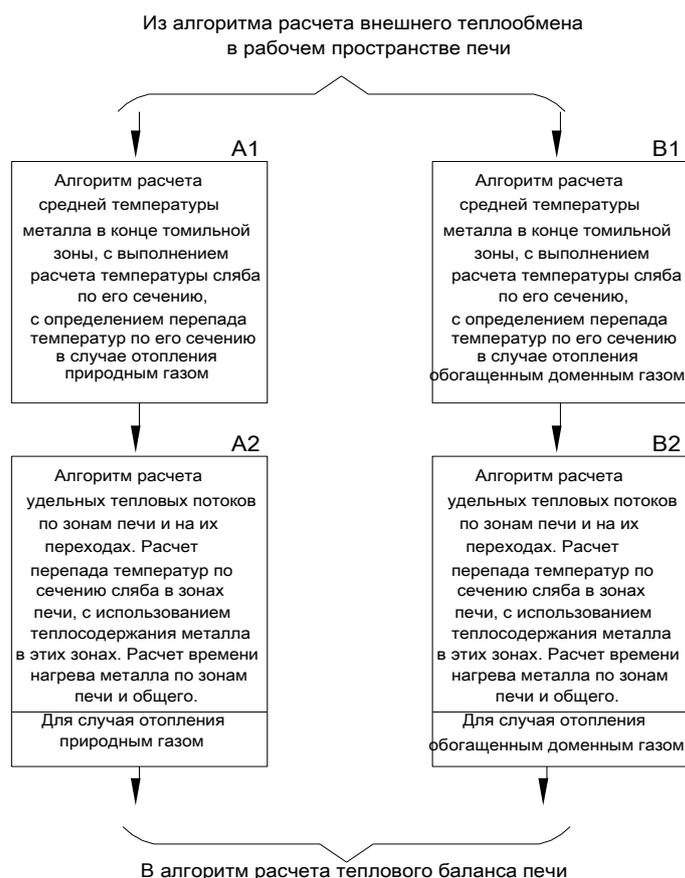


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма расчета нагрева металла в методической печи

1.2. Подпрограмма расчета коэффициентов теплопроводности стали при заданной температуре по зонам печи.

Расчет выполняется в зависимости от того, какой тип стали используется в данной режиме нагрева. Основные соотношения коэффициентов теплопроводности для различных температур имеют вид [3]: $\lambda_{200} = 0,95 \cdot \lambda_0$; $\lambda_{400} = 0,85 \cdot \lambda_0$; $\lambda_{600} = 0,75 \cdot \lambda_0$; $\lambda_{800} = 0,68 \cdot \lambda_0$; $\lambda_{1000} = 0,68 \cdot \lambda_0$; $\lambda_{1200} = 0,73 \cdot \lambda_0$, здесь λ_i – коэффициент теплопроводности стали при i -ой температуре 0°C .

1.3. Расчет действительных размеров слябов, с учетом коэффициента несимметричности двухстороннего нагрева:

$$M = M_{\text{а}} \cdot \mu, \quad S = S_{\text{а}} \cdot \mu, \quad (2)$$

где μ – коэффициент несимметричности двухстороннего нагрева (принимается 0,85 [1])

1.4. Подпрограмма расчета коэффициентов нагрева металла $m_{Bi}[i]$, $m_{\delta S^2}[i]$, $m_P[i]$, $m_M[i]$, $m_N[i]$. Так как в методической печи разогреваются слябы сечения $S \times M$, то коэффициенты будут иметь вид, $m_{\delta S^2}[i]$, $m_{\delta M^2}[i]$, $m_{PS}[i]$, $m_{PM}[i]$, $m_{MM}[i]$, $m_{MS}[i]$, $m_{NS}[i]$, $m_{NM}[i]$, $m_{BiS}[i]$, $m_{BiM}[i]$.

Решение дифференциального уравнения теплопроводности, применительно к рассматриваемому объекту запишем в следующем виде [2, 3]:

$$Q = \hat{O}_1 \cdot \hat{O}_2 \cdot \hat{a}^{-\beta \cdot a \cdot \tau} \quad (3)$$

В случае нагрева тел, ограниченных размеров значения температурного критерия находят путем перемножения функции тел бесконечной длины, в результате пересечения которых получается данное ограничение:

$$\frac{t_i - t_{i\hat{a}}}{t_{i\hat{a}} - t_{i\hat{a}^0}} = \hat{O}_1 \left(\frac{a \cdot \tau}{S^2}; \frac{a \cdot S}{\lambda}; \frac{x}{S} \right) \cdot \hat{O}_2 \left(\frac{a \cdot \tau}{M^2}; \frac{a \cdot M}{\lambda}; \frac{y}{M} \right), \quad (4)$$

где t_i – температура поверхности тела; $t_{i\hat{a}}^0$ – начальная температура тела; a – коэффициент теплопередачи (рассчитывается по ф.1); λ – коэффициент теплопроводности стали (см. п.1.2); τ – продолжительность нагрева металла для томильной зоны печи.

Значения критериев Фурье Φ_1 и Φ_2 [2] выбираются в зависимости от критериев Bi и Q . Значения Φ_1 и Φ_2 необходимы для расчета и выбора коэффициентов нагрева металла, перечисленных в п.1.4.

Выделим из уравнения 3 произведение $-\beta \cdot \hat{a} \cdot \tau$:

$$\ln \left(\frac{Q}{\hat{O}_1 \cdot \hat{O}_2} \right) = -\beta \cdot \hat{a} \cdot \tau, \quad (5)$$

где $\beta = \frac{(m_{\delta S}[i])^2}{S^2} + \frac{(m_{\delta M}[i])^2}{M^2}$ – коэффициент нагрева.

1.5. Расчет температуры ребра сляба в томильной зоне:

$$t_{SM} = t_{a5} - (t_{a5} - m_{t_{i1}}[t_{i1}]) \cdot m_{PS}[i] \cdot m_{PM}[i] \cdot e^{-\beta \cdot a \cdot \tau}, \quad (6)$$

где $m_{PS}[i]$, $m_{PM}[i]$ – коэффициенты нагрева металла (см. п.1.4).

1.6. Расчет температуры поверхности в середине грани сляба в томильной зоне:

$$t_{OM} = t_{a5} - (t_{a5} - m_{t_{i1}}[t_{i1}]) \cdot m_{NS}[i] \cdot m_{PM}[i] \cdot e^{-\beta \cdot a \cdot \tau}. \quad (7)$$

1.7. Расчет температуры поверхности на середине грани:

$$t_{SO} = t_{a5} - (t_{a5} - m_{t_{i1}}[t_{i1}]) \cdot m_{NM}[i] \cdot m_{PS}[i] \cdot e^{-\beta \cdot a \cdot \tau}. \quad (8)$$

1.8. Расчет температуры оси (центра) сляба:

$$t_{OO} = t_{a5} - (t_{a5} - m_{t_{i1}}[t_{i1}]) \cdot m_{NS}[i] \cdot m_{NM}[i] \cdot e^{-\beta \cdot a \cdot \tau}. \quad (9)$$

1.9. Расчет перепада температур между первым ребром и центром сляба:

$$\Delta t_1 = t_{SM} - t_{OM}. \quad (10)$$

1.10. Расчет перепада температур между вторым ребром и центром сляба:

$$\Delta t_2 = t_{SM} - t_{SO}. \quad (11)$$

1.11. Определение минимального перепада температур по сечению сляба:

$$\Delta t = \min \rightarrow (\Delta t_1, \Delta t_2). \quad (12)$$

1.12. Расчет средней температуры металла в конце томильной зоны:

$$t_{\text{н.д.}} = t_{a5} - (t_{a5} - m_{t_1}[t_{i1}]) \cdot m_{MS}[i] \cdot m_{MN}[i] \cdot e^{-\beta \cdot a \cdot \tau}. \quad (13)$$

1.13. Расчет продолжительности нагрева в томильной зоне:

$$\tau_{\delta} = \frac{\ln\left(\frac{Q}{\hat{O}_1 \cdot \hat{O}_2}\right)}{\beta \cdot a_{\delta}}. \quad (14)$$

Если не получена требуемая температура металла в томильной зоне (soaking zone) и перепад температур по сечению сляба не соответствует технологическому режиму (на стороне разгрузки), то посредством изменения продолжительности нагрева τ_{δ} добиваются требуемой температуры.

2. Блок расчета температур металла и времени нагрева в зонах: рекуперативной (recuperative), подогрева (preheating), нагрева 1 и 2 (heating 1, heating 2), где использовано свойство теплосодержания металла A2-B2 (см. рис. 1).

В результате выполненной работы предложен алгоритм нагрева металла в методической печи, основной задачей которого есть: обеспечение требуемых разгрузочной температуры и перепада температур по сечению сляба в конце нагрева.

Полученный алгоритм может рассматриваться как основа математической модели методической печи, на которой может решаться задача минимизации расхода топлива.

Литература

1. Расчеты нагревательных печей. Аверин С.И., Гольдфарб Э.М., Кравцов А.Ф., Радченко И.И., Розенгарт Ю.И., Свинолобов Н.П., Семикин И.Д, Тайц Н.Ю., «Техника». 1969. 540 с.

2. Теория, конструкции и расчеты металлургических печей: В 2-х томах. 2-е изд. перераб. и доп. Т2 Мастрюков Б.С. Расчеты металлургических печей. М.: Металлургия, 1986. 376 с.

3. Теория, конструкции и расчеты металлургических печей: В 2-х томах. 2-е изд. перераб. и доп. Т1 Кривандин В.А., Филимонов Ю.П. Теория и конструкция металлургических печей. М.: Металлургия, 1986. 479 с.

4. Алгоритм расчета процесса горения топлива методической печи / Ю.Г. Качан, А.В. Николенко, В.В. Степкин // Теория и практика металлургии. – 2007. – № 2–3 – с. 60–64.

5. Расчет внешнего теплообмена в рабочем пространстве методической печи. / Ю.Г. Качан, А.В. Николенко, В.В. Степкин // Теория и практика металлургии. – 2007. – № 2–3 – с. 64–66.