

ТРЕХМЕРНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ СЛЯБА ПО ХОДУ ПРОДВИЖЕНИЯ В ПЕЧИ С УЧЕТОМ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ТРУБ ОПОРНОЙ СИСТЕМЫ

Маштакова А.Г., магистрант; Симкин А.И., доц., к.т.н.

(ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, Украина)

Нагрев слэбов перед прокаткой в толстолистовом цехе ЧАО «ММК им. Ильича» производится в нагревательных семизонных печах с шагающими балками, с двухсторонним нагревом, с торцевым посадом и выдачей. Металл нагревается в результате радиационного теплообмена (лучеиспускания) от стен печи и продуктов сгорания топлива и конвективного теплообмена, возникающего при соприкосновении металла с продуктами сгорания.

Задача управления методическими печами заключается в целенаправленном ведении технологического процесса, обеспечении автоматизированного сбора и обработки информации, необходимой для оптимизации работы печей, а также в выработке и реализации управляющих воздействий на технологический объект управления.

Существующая автоматизированная система управления нагревом металла в методических печах введена в эксплуатацию в 1983 году и предназначена для управления процессами транспортирования и нагрева металла на участке. При управлении должны обеспечиваться необходимые, в соответствии с условиями прокатки, значения температуры поверхности металла и перепада температур по сечению заготовки на выходе из печи при согласовании темпа работы прокатного стана и минимальных затратах на передел. К основным задачам верхнего уровня относятся: задача расчета заданных значений температуры в зонах, задача выдачи этих значений на автоматические регуляторы локальных систем, ведение базы данных, выдача различных видеоформ с информацией на технологические посты и др.

Моделирование процессов нагрева металла является составной частью общей задачи построения автоматизированной системы управления нагревом металла. Назначение математической модели нагрева состоит в том, чтобы обеспечить систему информацией о температуре заготовок в текущий момент, и о возможной траектории нагрева в будущем - в зависимости от предполагаемых условий нагрева. На основе результатов расчета математической модели ведется автоматизированное управление методической печью.

Для математического моделирования теплового состояния нагреваемого слэба в действующей системе используется одномерное (по толщине слэба) дифференциальное уравнение теплопроводности для плиты. В связи с тем, что современные компьютеры обладают большим быстродействием, авторами предлагается заменить одномерную модель оценки теплового состояния слэбов на трехмерную. В этом случае изменение температуры металла по его толщине, ширине и длине описывается как:

$$\rho(T)c(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

где τ – время,

ρ – массовая плотность, кг/м³;

$\lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности металла, Вт/(м·град);

$c(T)$ – удельная теплоемкость металла, Дж/(кг·град);

x, y, z – декартовы координаты.

Удельная теплоемкость и теплопроводность металла являются функциями температуры.

Уравнение теплопроводности дополняется граничными условиями II рода:

- нижняя поверхность:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = E_p + \alpha_k(T_3 - T_m) \quad \text{при} \quad \frac{b}{2} < x < l \quad (2)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = q_p \quad \text{при} \quad 0 \leq x \leq \frac{b}{2} \quad (3)$$

- верхняя поверхность:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha_m E_{\text{эф}} - E_m + \alpha_k (T_3 - T_m) \quad (4)$$

- боковая поверхность:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad \text{при} \quad x = 0 \text{ и } x = l \quad (5)$$

где α_m – коэффициент поглощения металла (определяется по справочным данным);

α_k – коэффициент теплоотдачи конвекцией ($\alpha_k = 30 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$);

E_m – излучательная способность элемента нижней поверхности металла;

$E_{\text{эф}}$ – плотность потока эффективного излучения зоны;

q_p – теплообмен на участке контакта нижней поверхности металла с опорной шиной подовой трубы;

l – половина расстояния между опорными трубами;

b – ширина рейтера.

В уравнении (3) теплообмен на участке контакта нижней поверхности металла с опорной шиной подовой трубы определяется как:

$$q_p = \frac{\lambda_{\text{эк}}}{h} (T_m - T_{\text{ш}}) \quad (6)$$

где h – высота шины;

$\lambda_{\text{эк}}$ – эквивалентный коэффициент теплопроводности (константа, определяется по справочным данным);

T_m – текущее значение температуры нижней поверхности металла;

$T_{\text{ш}}$ – текущее значение температуры нижней поверхности шины.

В уравнении (4) плотность потока эффективного излучения зоны $E_{\text{эф}}$ определяется как:

$$E_{\text{эф}} = \psi(L_i) \bar{E}_{\text{эф}} \quad (7)$$

где L_i – текущее значение длины зоны;

$\psi(L_i)$ – безразмерная функция распределения (вид функции определяется по справочным данным для каждой зоны);

$\bar{E}_{\text{эф}}$ – средняя плотность эффективного излучения зоны, определяется как:

$$\bar{E}_{\text{эф}} = \varepsilon_{\text{эф}} C_0 \left(\frac{T_3}{100} \right)^4 \quad (8)$$

где T_3 – температура в зоне;

$\varepsilon_{\text{эф}}$ – степень черноты в зоне (константа, определяется по справочным данным);

C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела ($C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$).

Нагреваемый в методической печи металл непрерывно соприкасается с водоохлаждаемыми опорными трубами, плохо прогревается в местах соприкосновения и около них, что приводит к возникновению неравномерности нагрева, как по сечению, так и по длине заготовки. Таким образом, трубы опорной системы испарительного охлаждения имеют большое влияние на тепловую работу зоны нижнего обогрева и тепловую работу печи в целом.

Теплообмен на участке контакта опорной трубы с нижней поверхностью металла описывается на основе уравнений взаимосвязи теплового потока через трубу и температуры металла в месте контакта. Результирующая плотность потока излучения на элемент нижней поверхности сляба находится как:

$$E_p = \alpha_m E_{\text{эф}} [\varphi_{\text{мз}} + (1 - \alpha_r)(1 - \varphi_{\text{мз}}) \overline{\varphi_{\text{тз}}}] + \alpha_m (1 - \varphi_{\text{мз}}) E_{\text{т}} +$$

$$+ \alpha_m(1 - \alpha_t)(1 - \varphi_{m3})\overline{\varphi_{tm}} \overline{E_m} - E_m \quad (9)$$

где α_t – коэффициент поглощения труб (или изоляции труб);

E_t - излучательная способности трубы при средней температуре;

$\overline{E_m}$ – излучательная способность нижней поверхности металла при средней температуре;

E_m - излучательная способность элемента нижней поверхности металла;

φ_{m3} - угловой коэффициент переноса с поверхности dF на зону;

$\overline{\varphi_{tm}}$ - средний угловой коэффициент переноса с нижней поверхности трубы на металл;

$\overline{\varphi_{t3}}$ - средний угловой коэффициент с поверхности одной трубы на зону.

В уравнении (9) величина φ_{m3} определяется как:

$$\varphi_{m3} = \frac{1}{2} \left(\frac{2l - b - x}{\sqrt{h^2 + (2l - b - x)^2}} + \frac{x - b}{\sqrt{a^2 + (x - b)^2}} \right) \quad (10)$$

где a – длина рейтера;

x - текущая координата.

Величины $\overline{\varphi_{tm}}$ и $\overline{\varphi_{t3}}$ находятся из выражения:

$$\overline{\varphi_{t3}} = \overline{\varphi_{tm}} = \frac{l - b}{h} \left[1 - \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{2l - b}{h}\right)^2} - 1}{\frac{2l - 2b}{h}} \right] \quad (11)$$

Решая дифференциальное уравнение теплопроводности (1) методом конечных разностей можно получить итерационные формулы для расчета температуры сляба в процессе нагрева.

Модель нагрева слябов в методической печи с шагающими балками реализована в программной среде C++Builder, и позволяет рассчитать температурное состояние металла в процессе нагрева с учетом влияния изоляции подовых труб, и определить распределение температуры по сечению сляба на выдаче из печи. Для проверки адекватности модели, полученные результаты сопоставлялись с опытными данными, полученными во время экспериментальных прогонов сляба в печи с зачеканенными термопарами. Разница между расчетными и экспериментальными значениями температур в методической зоне не превышает 25 °С, сварочных зон – 15 °С, томильной зоны ±6 °С. Несоответствие температурных полей объясняется погрешностями измерения температуры в зонах печи и погрешностями эксперимента.

Выводы:

1. Разработана трехмерная математическая модель нагрева слябов в методической печи с шагающими балками, которая учитывает влияние изоляции труб опорной системы на температурное состояние нагреваемой заготовки.

2. Трехмерная математическая модель реализована программно, и позволяет рассчитать распределение температуры по сечению сляба в процессе нагрева в печи.

3. Разработанную программу оценки теплового состояния сляба целесообразно использовать как часть программного обеспечения АСУТП нагрева металла перед прокаткой для информационного обеспечения подсистемы управления.

Перечень ссылок

1. Кривандин А.В. Тепловая работа и конструкция печей черной металлургии./Кривандин А.В., Егоров А.В. – М: Металлургия, 1989. – 462 с.

2. Быков В.В. Выбор режимов нагрева металла / Быков В.В., Франценюк И.В., Хилков Б.М., Щапов Г.А. – М: Металлургия, 1980. – 168 с.