

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НАГРЕВА МЕТАЛЛА ДЛЯ АСУ МЕТОДИЧЕСКОЙ ПЕЧИ С УЧЕТОМ ИСТИННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛИ

Снижение энергозатрат и повышение качества нагрева металла напрямую связано с наличием и эффективностью работы автоматических систем управления тепловой работы агрегата. В настоящее время все больше внимания уделяется методам автоматического управления, сопряженным с быстродействующими (1–2 мин.) математическими моделями, работающим в режиме реального времени. Однако на данный момент существует множество различных математических моделей, которые позволяют производить расчеты нагрева металла в методических печах, но неспособные к моделированию в режиме реального времени по различным причинам (сложность системы расчетов, большое количество исходных данных, необходимые для получения результатов и т.д.).

В связи с этой проблемой было принято решение о необходимости создания быстродействующей математической модели нагрева металла в методической печи для АСУ в режиме реального времени.

Наличие такой модели позволит реализовать автоматическое управление тепловой работы печи с расчетами температурного поля в сечении заготовок в режиме реального времени. Это позволит оценивать тепловое состояние заготовки не только на выходе из печи, но и в течение всего времени нагрева, особенно при переходных режимах и остановках.

Неотъемлемой частью создания такой модели является разработка подмодели, которая позволяла бы учитывать истинные значения теплофизических свойств (теплоемкость и теплопроводность) определенной марки стали от ее температуры также в режиме реального времени. Для решения такой задачи составления модели нагрева заготовок с учетом их истинных значений теплофизических свойств была использована программа MathLab со встроенным в нее пакетом программ FemLab.

Для моделирования процесса термической обработки заготовок в методической печи была составлена программа, позволяющая решить внутреннюю задачу нагрева металла. Для определения температуры заготовки любой марки стали при прохождении ее по печи необходимо располагать небольшим количеством показателей работы установки,

такими как температуры продуктов горения в каждой из зон (T_{cp}), длина данных зон (L), время пребывания заготовки в каждой из зон (T_n), коэффициент теплоотдачи конвекцией (α) и приведенный коэффициент излучения от продуктов сгорания на металл с учетом тепла, отраженного от кладки печи на металл ($C_{г.к.м.}$), а также высоты и плотности (ρ) обрабатываемых заготовок.

По заданию данных величин в модели в виде постоянных необходимо перейти к характеристикам заготовок, изменяющихся по ходу их прохождения и нагрева в печи.

Таковыми характеристиками, играющими важную роль при нагреве стальной заготовки в высокотемпературных нагревательных печах, являются её теплофизические свойства, теплоемкость и теплопроводность, зависящие от химического состава металла.

Для фазовых превращений, имеющих место в металле во время нагрева заготовки в высокотемпературных печах, характерно скачкообразное изменение энтальпии. Теплоемкость при этом также испытывает скачок, сопровождающийся резким максимумом. Причем теплоемкость низкотемпературной фазы, как правило, больше теплоемкости высокотемпературной фазы.

Для учета такого скачкообразного изменения данной теплофизической величины при построении модели нагрева использовалась формула

$$c(T) = c_0 + \sum \frac{m_i L_i}{\Delta T_i} \exp[-a_i^2 (\frac{T_{i0} - T}{T_{i0} - T_{i1}})] \quad (1)$$

где T_1 и T_0 – температуры начала и окончания фазовых превращений соответственно, °С;

c_0 – теплоемкость стали при отсутствии фазовых превращений, Дж/кг·°С;

L_i – теплота эвтектоидного превращения, кДж/кг;

m_i , a_i – константы, зависящие от функции ошибок;

T – текущая температура в рассматриваемых точках, °К.

Так, на рис. 1 показаны зависимости теплоемкости углеродистой стали У8, аустенитной 1Х18Н9Т и нержавеющей 2Х13 от температуры. Обращает на себя внимание отсутствия резкого скачка значения теплоемкости для стали 1Х18Н9Т, что можно объяснить отсутствием у этой марки стали фазовых превращений в рассматриваемом диапазоне температур. У стали марки 2Х13 наблюдается сразу два экстремума теплоемкости – первый в интервале 650–800 °С и второй – 800–900 °С.

Помимо теплоемкости, серьезное влияние на нагрев заготовок в методических печах играет теплопроводность. При составлении модели нагрева заготовок коэффициент теплопроводности учитывался в соответствии с формулами:

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

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

где λ_0 и λ_1 – максимальное и минимальное значения теплопроводности стали, соответственно, Вт/м²·К;

T_{m1} – температура экстремального значения теплопроводности, °К.

$$\theta_1 = \frac{T - T_{m0}}{T_{m1} - T_{m0}} \text{ и } \theta_2 = \frac{T - T_{m1}}{T_{m2} - T_{m1}}.$$

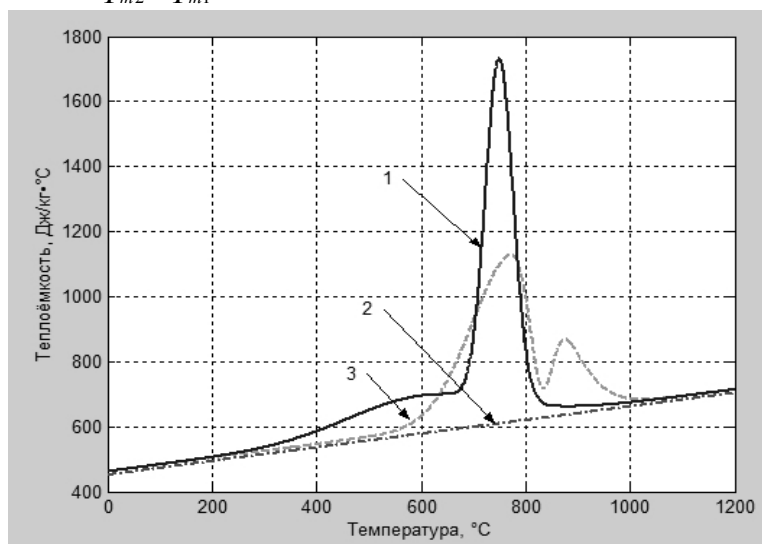


Рис. 1. Зависимости теплоемкости от температуры для различных марок стали:

1 – У8; 2 – 1Х18Н9Т; 3 – 2Х13

Используя данные уравнения, можно учесть истинные значения теплопроводности заготовки различных марок стали при прохождении её по методической печи. На рис. 2 показаны зависимости теплопроводности аналогичных марок стали от их температуры, полученные в соответствии с уравнением 2.

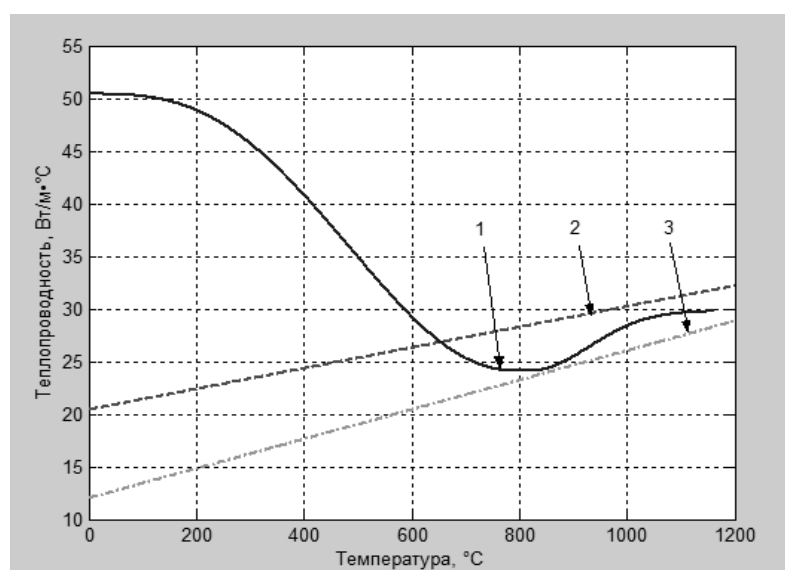


Рис. 2. Зависимости теплопроводности от температуры для различных марок стали: 1 – У8; 2 – 1Х18Н9Т; 3 – 2Х13

Из сравнения кривых зависимостей теплоемкости и теплопроводности от температуры с экспериментальными данными, были сделаны выводы о том, что данные формулы соответствуют экспериментальным данным.

Учет граничных условий второго рода производится по уравнению

$$n \cdot (k \nabla T) = \alpha \cdot (T_{cp} - T) + \sigma \cdot (T_{cp}^4 - T^4), \quad (3)$$

где α – коэффициент теплоотдачи конвекцией, Вт/м²·К;

σ – коэффициент излучения на металл, Вт/м²·К⁴;

T_{cp} – температура греющей среды, °К.

Таким образом, по окончании определения всех зависимостей теплофизических величин необходимой марки стали от температуры, при помощи данной модели можно определить температуру заготовки в любой момент времени пребывания ее в печи в любой точке по сечению. Пример такой зависимости представлен на рис. 3, где показан пример расчета нагрева блюда марки 1X18H9T высотой 100 мм в методической печи в трех точках по сечению:

- 1 – 10 мм от верхней поверхности блюда;
- 2 – середина блюда;
- 3 – 10 мм от нижней поверхности блюда.

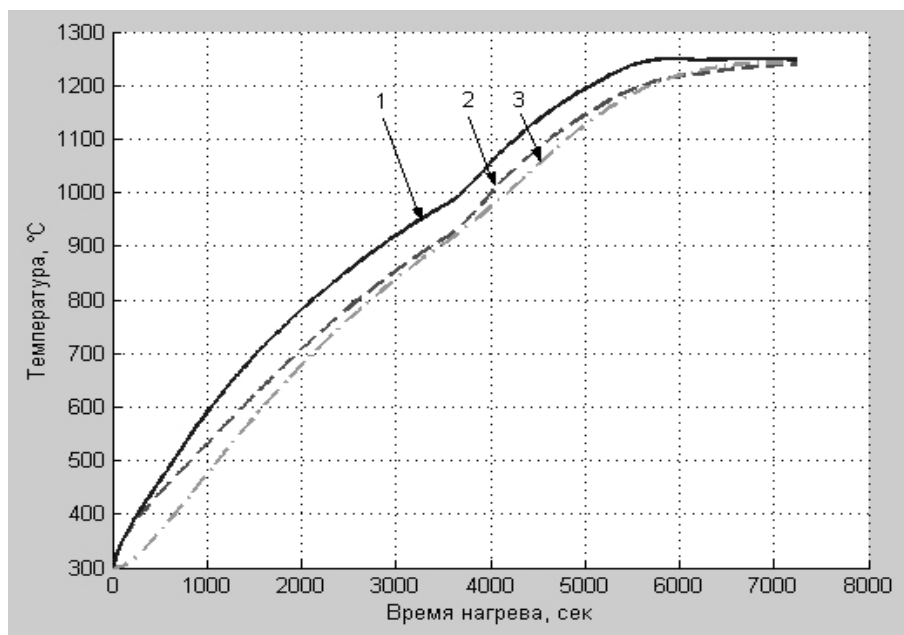


Рис. 3. Температура блюда марки 1X18H9T при нагреве в методической печи

Расчет температуры заготовки при моделировании процесса нагрева осуществляется по формуле

$$\rho \cdot C_m \cdot T' - \nabla \cdot (\lambda_m \nabla T) = \alpha (T_{cp} - T) + \sigma (T_{cp}^4 - T^4), \quad (4)$$

где C_m – теплоемкость металла, Дж/кг·°К;

λ_m – теплопроводность металла, Вт/м²·°К.

Таким образом, с использованием данных прикладных программ была решена внутренняя задача нагрева металла и создана математическая модель нагрева стали различных марок в проходной методической печи с учетом зависимости истинных значений теплофизических свойств (теплоемкость и теплопроводность) от температуры.