

УДК 669.04; 519.8

В.В. Курносов, И.А. Левицкий

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА ЗАГОТОВОК С ПЕРЕМЕННЫМИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ И ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА, СООТВЕТСТВУЮЩЕГО ЗАДАННОМУ ГРАФИКУ НАГРЕВА¹

При инженерных расчетах нагрева металла в нагревательных и термических печах обычно использовались таблицы экспериментальных значений удельной теплоемкости металла, усредненных по интервалу температур от некоторого стандартного значения T_0 (обычно 50 °С) до данной температуры T . Это было удобно для ручных расчетов, имеющих оценочный балансовый характер для всего процесса нагрева. С развитием вычислительной техники все чаще для расчета нагрева металла применяется метод конечных разностей, в рамках которого весь исследуемый период нагрева разбивается на последовательность относительно небольших интервалов – шагов по времени (при этом на каждом шаге по времени возможно уточнение теплофизических характеристик). Для таких расчетов удобнее пользоваться таблицами, содержащими значения истинной теплоемкости (т.е. при данной температуре) или средние значения по относительно небольшим интервалам температур (50 – 100 °С).

В принципе, имея достаточно подробные таблицы средних значений для интервалов от T_0 до T , нетрудно получить значения, средние по любому более короткому интервалу $[T_1; T_2]$

$$\bar{c}_{T_1}^{T_2} = \frac{\bar{c}_{T_0}^{T_2} (T_2 - T_0) - \bar{c}_{T_0}^{T_1} (T_1 - T_0)}{T_2 - T_1}, \quad (1)$$

поэтому достаточно иметь правильное представление о том, какие именно значения теплоемкости должны фигурировать в данном расчете.

Однако в некоторых литературных источниках приведены таблицы зависимости удельной теплоемкости материала от температуры без четкого указания на то, какие именно значения (средние по интервалу $[T_0; T]$, средние по некоторой окрестности данной температуры T или истинные, соответствующие температуре T) содержатся в данной таблице. В то же время для ряда материалов в достаточно узких температурных интервалах проходят фазовые превращения, сопро-

вождающиеся тепловыми эффектами. При экспериментальном определении удельной теплоемкости эти тепловые эффекты проявляются в виде достаточно сильных локальных изменений кажущейся удельной теплоемкости материала, дающих, однако, небольшой вклад в средние значения для больших температурных интервалов. Для таких материалов замена истинных значений средними (при расчетах с малыми шагами по времени) может привести к очень большой расчетной погрешности.

На рис. 1 сопоставлены значения удельной теплоемкости, усредненной по 50-градусным температурным интервалам, и средней по интервалу от 50 °С до данной температуры для стали 08кп (по данным работы [1]). Видно, что особенности кривой, соответствующей локальным значениям теплоемкости, слабо отражаются на кривой для среднего значения, а сами кривые существенно различаются.

В технологических инструкциях процесса термической обработки стальных заготовок обычно задается режим в виде последовательности периодов регулируемого (т.е. с заданной скоростью) нагрева и выдержек при заданной температуре. Управление процессом производится по показаниям технологических термопар, установленных в рабочем пространстве печи вблизи поверхности нагреваемого металла; подразумевается, что примерно такой же температурно-временной график реализуется на поверхности металла.

Однако для термически массивных заготовок не существует однозначной связи между температурой

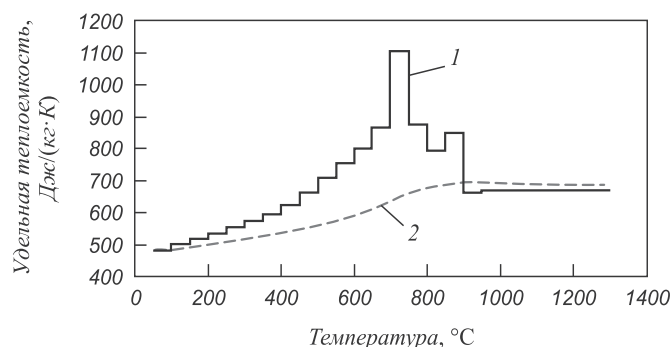


Рис. 1. Сопоставление среднего (2) и локального (1) значений удельной теплоемкости для стали 08кп

¹ Работа выполнена в рамках гранта «Создание сквозной энергосберегающей технологии термообработки ответственных изделий атомной энергетики на основе энергоэффективного оборудования» по Постановлению правительства РФ № 218 от 09.04.2010.

поверхности и температурами внутренних точек; пригодность того или иного режима к заготовкам данного размера и конкретной марки стали является эмпирическим фактом. Наличие тепловых эффектов фазовых превращений может существенно отразиться на температурном поле заготовок.

В данной работе рассматриваются результаты расчетов нагрева цилиндрических заготовок из стали 08кп (первоначально равномерно прогретых до температуры 600 °С) по режиму, предусматривающему регулируемый нагрев до 1200 °С со скоростью 100 °С/ч с последующей выдержкой при этой температуре.

Математической моделью процесса нагрева заготовок является одномерная нестационарная задача теплопроводности в бесконечном сплошном цилиндре радиусом R с переменными теплофизическими свойствами (λ , ρ , c), описываемая нелинейным уравнением теплопроводности (2), однородным начальным условием (3), граничным условием второго рода (4) на поверхности и условием симметрии на оси цилиндра (5):

$$c(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\lambda(T)r\frac{\partial T}{\partial r}\right), \quad 0 < r < R; \quad (2)$$

$$T(r, 0) = T_n; \quad (3)$$

$$\lambda\frac{\partial T}{\partial r}\bigg|_{r=R} = q_w(t); \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r}\bigg|_{r=0} = 0. \quad (5)$$

Численное решение описанной задачи осуществляли методом конечных разностей, разностные аналоги для уравнения теплопроводности и краевых условий получали методом баланса, применяя разностную Кранка–Николсона [2].

Особенностью постановки задачи является тот факт, что переменная во времени плотность теплового потока $q_w(t)$, задаваемая в качестве граничного условия на поверхности, должна обеспечивать требуемый гра-

фик нагрева по поверхности заготовки. Необходимую связь между задаваемой температурой поверхности, соответствующей графику нагрева, и плотностью теплового потока на поверхности находили из разностного аналога граничного условия (4), используя для их согласования итерационную процедуру. Получение требуемого для обеспечения заданного режима нагрева графика $q_w(t)$ являлось одной из главных целей проводимого исследования.

Расчеты по описанной выше математической модели, программно реализованной в среде VBA для Microsoft Office 2003, проводились для двух значений диаметра заготовки (0,5 и 1,5 м) в рамках трех различных подходов к описанию теплофизических характеристик:

1. Теплофизические характеристики считаются постоянными, не зависящими от температуры (берутся из таблиц, приведенных в работе [1], при 600 °С).

2. Зависимость теплофизических характеристик от температуры задается в соответствии с данными работы [1], причем в качестве теплоемкости используется ее среднее значение на интервале от 50 °С до заданной температуры (пунктирная кривая на рис. 1).

3. Зависимость теплофизических характеристик от температуры задается в соответствии с данными работы [1], причем в качестве теплоемкости используются ее локальные значения, средние по интервалам протяженностью 50 °С (сплошная кривая на рис. 1).

Сопоставление этих вариантов позволит оценить как погрешность приближения, в котором не учитывается температурная зависимость теплофизических характеристик, так и погрешность, связанную с использованием значений средней теплоемкости вместо локальной. Результаты моделирования для заготовки диаметром 0,5 м представлены на рис. 2, 3.

Как видно из представленных данных, при постоянных теплофизических характеристиках величина плотности теплового потока на поверхности заготовки, требуемая

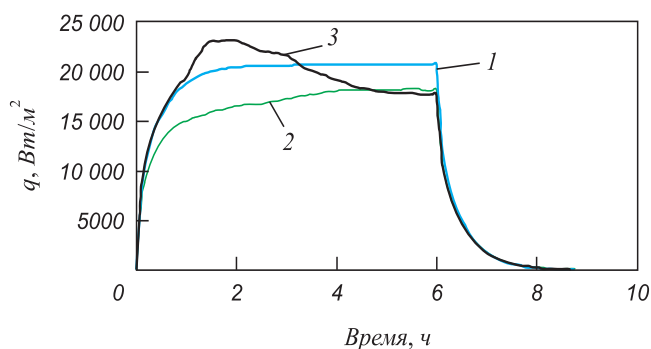


Рис. 2. Изменение требуемой плотности теплового потока на поверхности заготовки диаметром 0,5 м:
1 – 3 – номера вариантов

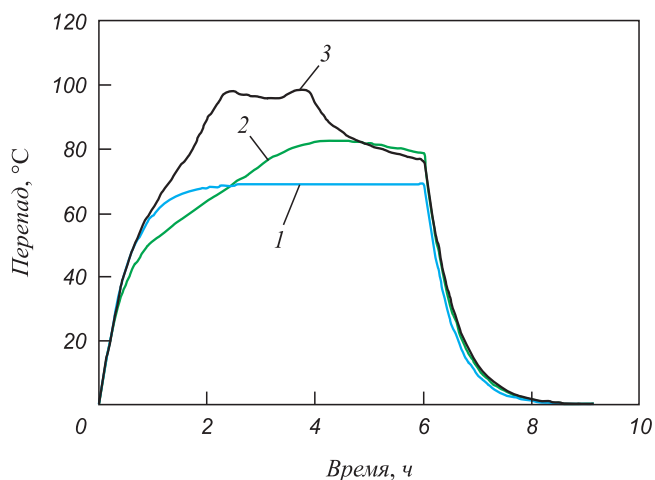


Рис. 3. Изменение температурного перепада по сечению заготовки диаметром 0,5 м в процессе нагрева:
1 – 3 – номера вариантов

для достижения постоянной скорости нагрева поверхности, достаточно быстро (в течение 2 ч) выходит на постоянное значение $20\,688\text{ Вт/м}^2$ (рис. 2), что соответствует наступлению регулярного теплового режима с граничными условиями второго рода, при котором все точки нагреваемой заготовки имеют одинаковую постоянную скорость нагрева, а температурный перепад принимает постоянное значение (рис. 3). Величина температурного перепада для заготовки диаметром 0,5 м составляет к началу выдержки около $70\text{ }^\circ\text{C}$. После начала изотермической выдержки величина перепада начинает снижаться, достигая через 2 ч выдержки значения $1\text{ }^\circ\text{C}$.

Если вместо постоянных значений теплофизических характеристик задавать средние для интервала от $50\text{ }^\circ\text{C}$ до T для теплоемкости и истинные – для всех остальных (вариант 2), то такой расчет даст более низкие значения требуемой плотности теплового потока на поверхности (около $18\,220\text{ Вт/м}^2$ к началу выдержки), однако выход на регулярный режим наступает только примерно через 4 ч нагрева, при этом итоговый перепад к концу этапа регулируемого нагрева достигает $78\text{ }^\circ\text{C}$.

Для варианта 3, в котором используются локальные значения удельной теплоемкости для каждого температурного интервала протяженностью $50\text{ }^\circ\text{C}$, величина требуемой плотности теплового потока на поверхности заготовки не стремится к некоторому постоянному значению, максимальному для всего периода нагрева, как в предыдущих вариантах, а достигает максимального значения $23\,200\text{ Вт/м}^2$ через 2 ч нагрева, а затем к началу выдержки становится даже чуть меньше, чем в варианте 2. Аналогично изменяется величина перепада температуры по сечению заготовки: в варианте 3 она достигает $98\text{ }^\circ\text{C}$ ($2,4 - 3,9\text{ ч}$), выходя к началу выдержки на регулярное значение $69\text{ }^\circ\text{C}$.

Совершенно иная картина наблюдается при нагреве заготовки диаметром 1,5 м (рис. 4, 5).

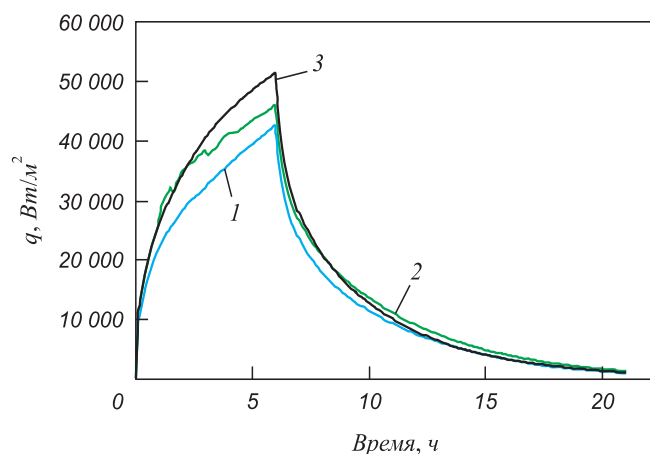


Рис. 4. Изменение требуемой плотности теплового потока на поверхности заготовки диаметром 1,5 м:
1 – 3 – номера вариантов

К началу выдержки заготовка не успевает прогреться настолько, чтобы наступил регулярный режим (в начале выдержки для рассматриваемых вариантов требуемая плотность теплового потока составляет $51\,167$, $42\,427$ и $45\,813\text{ Вт/м}^2$, а перепад по сечению составляет 450 , 448 и $503\text{ }^\circ\text{C}$, соответственно). Во всех вариантах значения, достигнутые к началу выдержки, являются максимальными, за 15 ч выдержки температурные перепады снижаются, соответственно, до значений 15 , 24 и $28\text{ }^\circ\text{C}$.

В целом (по сравнению с заготовкой меньшего диаметра) не так заметно различие между разными вариантами (оно имеет только количественный характер, принципиальный ход кривых одинаков, так как тепловые эффекты фазовых переходов распределены на значительный временной интервал).

Заслуживает внимание тот факт, что при более точном описании температурной зависимости теплофизических характеристик получаются более высокие значения температурных перепадов по сравнению с упрощенными подходами, однако требуемая плотность теплового потока, подводимого к заготовке, в этом варианте имеет не экстремальное, а промежуточное между другими вариантами значение.

Выводы. Для поддержания постоянной скорости нагрева по поверхности массивной заготовки с постоянными теплофизическими характеристиками требуемая величина плотности теплового потока на поверхности заготовки в процессе нагрева возрастает, достигая некоторого постоянного значения, а затем перестает изменяться – наступает регулярный режим; для крупных заготовок регулярный режим к началу выдержки может так и не наступить.

Наличие фазовых превращений существенно влияет на значения требуемой величины плотности теплового потока на поверхности заготовки и перепада температуры по ее сечению, а также на характер изменения этих величин во времени в процессе

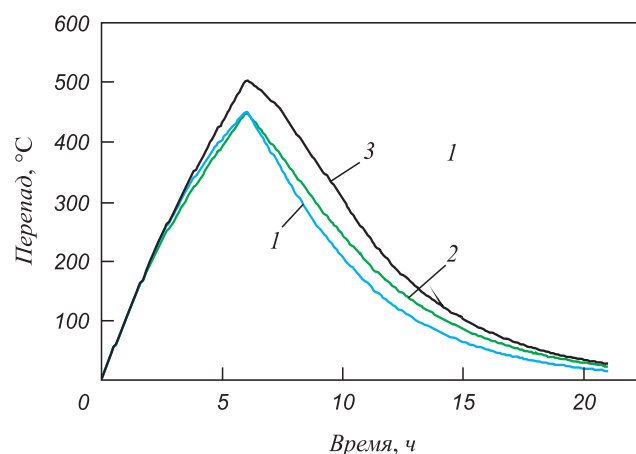


Рис. 5. Изменение перепада температуры по сечению заготовки диаметром 1,5 м в процессе нагрева:
1 – 3 – номера вариантов

регулируемого нагрева заготовок не очень большого сечения.

При нагреве очень крупных заготовок максимальные значения требуемой плотности теплового потока на поверхности и температурного перепада по сечению заготовки достигаются в конце периода регулируемого нагрева; при этом наличие фазовых превращений изменяет только значения этих величин, а характер их изменения во времени остается практически прежним.

УДК 621.746.56

Б.П. Юрьев

Уральский федеральный университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПОДГОТОВКЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИИ ШЛАКООБРАЗУЮЩИХ СМЕСЕЙ

Анализ современного состояния организации разлива и защиты металла на машинах непрерывного литья заготовок показал, что защита струи металла погружаемыми стаканами и трубками в сочетании с защитой зеркала его в промежуточных ковшах и кристаллизаторах шлаками занимает ведущее место в производстве высококачественных заготовок [1 – 3].

Шлакообразующая порошкообразная смесь, подаваемая на мениск металла в кристаллизаторе, защищает расплавленный металл от вторичного окисления, ассимилирует неметаллические включения, выполняет роль смазки рабочих стенок кристаллизатора и уменьшает потери теплоты в окружающую среду.

Шлакообразующие смеси, используемые при непрерывной разливке стали и обработке в ковше, представляют собой специально приготовленные многокомпонентные и многофазные системы. При подготовке и использовании шлакообразующих смесей в них протекают сложные физико-химические превращения, связанные с изменением химического и фазового состав, протеканием экзо- и эндотермических эффектов, формированием силикатов и шлакового расплава. Наличие этих данных позволяет прогнозировать технико-экономические показатели (включая теплотраты) использования смесей как на стадии выбора исходных материалов при изготовлении гранул, так и при разливке стали.

В данной работе исследовались шлакообразующие смеси, приготовленные путем грануляционной распылительной сушки¹. Исходную механическую смесь минеральных ингредиентов вначале подвергают суспензированию в водном растворе, содержащем хлорид кальция, сульфитно-спиртовую барду (ССБ) и карбоне-

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Казанцев Е.И. Промышленные печи. Справ. руководство для расчетов и проектирования. 2-е изд. доп. и перераб. – М.: Металлургия, 1975. – 368 с.
2. Арутюнов В.А., Бухмиров В.В., Крупенников С.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей. – М.: Металлургия, 1990. – 240 с.

© 2012 г. В.В. Курносое, И.А. Левицкий
Поступила 12 мая 2012 г.

тилцеллюлозу (КМЦ). Количество ингредиентов контролируют, регулируя устойчивость суспензии и прочность получаемых гранул. Затем суспензию распыляют в газопламенном теплоносителе.

Фазовые и химические превращения в смесях возможны уже на стадии их изготовления. Исходный фазовый состав шлакообразующих смесей – важная характеристика, так как именно ею определяются особенности формирования из смеси шлака, а также теплотраты.

Исходный ингредиентный состав исследованных смесей приведен в табл. 1.

Рентгенограммы порошков, изготовленных из исследованных веществ, снимали на дифрактометре ДРОН-3 (CuK_α). Обработкой дифрактограмм определяли характерные межплоскостные расстояния и интенсивности соответствующих линий. Инфракрасные спектры в области $400 - 4000 \text{ см}^{-1}$ получены на спектрофотометре UR-20. Вещества для исследований смешивали с бромидом калия (1 мг вещества на 300 мг KBr) и прессовали в таблетки. Термогравиметрические исследования проводили в атмосфере воздуха на дериватографе Паулик-Паулик-Эрдей. Эталонном сравнении служил прокаленный оксид алюминия. Скорость нагрева составляла $5^\circ\text{C}/\text{мин}$, температура 1000°C , масса навески вещества $800 - 900 \text{ мг}$.

Обработка дифрактограмм показала, что исходный кремнезем – рентгеноаморфное вещество. Его порошковая характеристика характеризовалась высоким малоинтенсивным максимумом в области $\theta = 9 - 13^\circ$ с вершиной 11° ($d = 0,4 \text{ нм}$). Порошковые исходной извести и плавикового шпата совпадали с приводимыми в литературе [4]. Рентгенограмма нефелина характеризовалась набором линий малой интенсивности, что может свидетельствовать о неупорядоченности структуры вещества.

¹ Пат. 1459068 РФ. 1993.