

УДК 621.78

А. Б. БИРЮКОВ (канд. техн. наук, доц.),**В. В. КРАВЦОВ** (д-р техн. наук, проф.)

ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПОДХОДОВ К ИССЛЕДОВАНИЮ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ НАГРЕВА И ТЕРМООБРАБОТКИ ЗАГОТОВОК НА ОСНОВЕ МЕТОДА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассмотрены перспективы использования метода математического моделирования для изучения температурного состояния заготовки при операциях нагрева и термообработки, показаны дополнительные возможности по сравнению с использованием аналитических методик.

математическое моделирование, температурное состояние заготовки, нагрев, термообработка

Эффективное управление работой нагревательных и термических печей возможно только на основе расчетной модели, устанавливающей связь между требуемыми характеристиками температурного поля заготовок и параметрами нагрева (время нагрева, расход газа и т.д.). Известна аналитическая методика для расчета нагрева заготовок в нагревательных печах [1], которая характеризуется достаточной точностью и простотой и поэтому широко используются до сих пор. Однако использование этой методики сопряжено с рядом недостатков. Один из них сводится к тому, что в результате расчета определяются только три температуры в плоскости поперечного сечения заготовки (температура центра, поверхности и среднemasсовая температура). Конечно, на основании этих величин можно формировать представление о температурном поле заготовки в целом, однако на практике удобнее иметь полную картину распределения температур по сечению заготовки. Второй недостаток связан с использованием теплофизических свойств металла, определенных для среднemasсовой температуры заготовки, что может приводить к погрешности определения температур конкретных точек в массиве заготовки. Кроме того, методика ориентирована на изучение нагрева заготовок за счет лучистого теплообмена и напрямую не может быть использована для изучения температурного поля заготовок в термических печах, в которых кроме нагрева используются операции охлаждения, выравнивания и выдержки.

Использование метода математическое моделирование температурного поля заготовки решает вышеуказанные проблемы. Температурное поле определяется для узлов сетки, условно нанесенной на расчетное сечение заготовки (при достаточном числе узлов получаем практически сплошную кривую). Имеется возможность учета теплофизических свойств в зависимости от локальных значений температуры.

При отсутствии внутренних источников тепла в каждый момент времени распределение температур в нагреваемом теле описывается дифференциальным уравнением нестационарной теплопроводности [2]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda_m(t)}{c_m(t) \cdot \rho_m(t)} \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right), \quad (1)$$

где λ_m – коэффициент теплопроводности металла заготовки, Вт/(м·К); ρ_m – плотность металла заготовки, кг/м³; c_m – теплоемкость металла заготовки, Дж/(кг·К); x, y – координаты, отсчитываемые вдоль осей симметрии в поперечном сечении заготовки.

Известны многие работы, посвященные математическому моделированию температурного поля заготовок, обрабатываемых в нагревательных печах. В этих работах проанализированы подходы к заданию граничных условий в математической модели. Причем в ряде работ проведено математическое моделирование нагрева заготовок в печах с несимметричным факелом [3].

В данной работе проанализированы пути расширения применения метода математического моделирования для изучения вышеназванных тепловых процессов обработки заготовок в термических и нагревательных печах. Так, задание граничных условий третьего рода позволяет использовать рассматриваемую модель также для исследования температурного поля заготовок в термических печах (охлаждение, выдержка, нагрев).

$$\begin{aligned} x = -a/2, x = a/2 : -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} &= \alpha_{\Sigma} (t_{cp} - t_n); \\ y = -b/2, y = b/2 : -\lambda \frac{\partial t}{\partial y} &= \alpha_{\Sigma} (t_{cp} - t_n) \end{aligned}$$

где a – толщина заготовки, м; b – ширина заготовки, м; t_{cp} – текущее значение температуры продуктов сгорания (теплообменивающейся среды), °С; t_n – текущее значение температуры поверхности заготовки, °С; α_{Σ} – итоговый коэффициент теплоотдачи от теплообменивающейся среды к поверхности заготовки (или наоборот от поверхности заготовки к теплообменивающейся среде), Вт/(м²·К)

Итоговый коэффициент теплоотдачи определяется как сумма лучистой α_n и конвективной α_k составляющих.

При термообработке заготовок одной из часто применяемых операций является выравнивание температур. По мере уменьшения перепада температур по сечению заготовки процесс идет с замедляющейся скоростью. При этом точное отслеживание поля температур позволит более точно выбирать время обработки, что позволит в ряде случаев избежать ее затягивания и повысит производительность термической печи.

Известно, что нагрев ряда марок стали, в виду их низкой пластичности в некоторых температурных диапазонах, сопровождается риском образования трещин. Как известно из «сопротивления материалов», для образования трещины в формирующейся заготовке необходимо, чтобы в какой-либо области заготовки имело место хотя бы одно из соотношений

$$\sigma > \sigma_{\text{доп}}; \quad \epsilon > \epsilon_{\text{доп}}; \quad \dot{\epsilon} > \dot{\epsilon}_{\text{доп}},$$

где σ , ϵ , $\dot{\epsilon}$ – текущие значения напряжения, деформации или скорости деформации для какой-либо области заготовки, определенные на основе анализа ее напряженно-деформированного состояния;

$\sigma_{\text{доп}}$, $\epsilon_{\text{доп}}$, $\dot{\epsilon}_{\text{доп}}$ – допустимые значения напряжения, деформации или скорости деформации для какой-либо области заготовки, определенные для заданного химического состава металла и локальной температуры.

Методики определения поля величин напряжений, деформаций и скорости деформации для нагреваемой заготовки достаточно сложны. Но в случае термической нагрузки поле этих величин определенным образом связано с темпом изменения температуры и температурным градиентом. Нахождение поля этих величин позволит даже без специальных подходов сопротивления материалов формировать качественное представление о поле величин σ , ϵ , $\dot{\epsilon}$, а простейшие действия над ними дадут возможность получать приближенную количественную оценку.

Для любой точки, принадлежащей расчетному сечению заготовки, темп изменения температуры (производная от температуры по времени) определяется следующим образом:

$$\left. \frac{\partial t}{\partial \tau} \right|_{j,k} = \frac{t_{j,k}^i - t_{j,k}^{i-1}}{\Delta \tau},$$

где j, k – координаты узла, соответствующего изучаемой точке, в плоскости рассматриваемого сечения заготовки;

$i, i-1$ – рассматриваемый и предыдущий момент времени;

$\Delta \tau$ – шаг по времени.

При анализе эффективности нагрева или охлаждения на практике используют такую величину как скорость изменения температуры металла, при этом предпочтение отдается единицам измерения $^{\circ}\text{C}/\text{ч}$. Однако нет единообразия подходов о том изменение какой из температур следует от-

слеживать: (температуры поверхности или среднемассовой). Ведь в начальные периоды времени, особенно до прохождения инерционного периода, их отличие очень значительно. С этой точки зрения нахождение распределения темпа изменения температуры по сечению заготовки представляется особенно важным.

Дополнительная возможность использования темпа изменения температуры заключается в анализе влияния тепловых параметров нагрева и охлаждения на фазовые преобразования в массиве металла и, таким образом, может содержать основы целенаправленного управления микроструктурой. Так известно, что характер и глубина преобразований зависят от скорости нагрева (охлаждения) в определенных температурных диапазонах. Получение совмещенной информации о распределении поля температур и темпа ее изменения в расчетном сечении заготовки в конкретный момент позволят построить диаграмму (рис. 1). На ней условно построен темп изменения температуры по толщине заготовки и нанесено несколько характерных диапазонов структурных преобразований (поскольку в результате определения температурного поля известно распределение температуры по толщине заготовки).

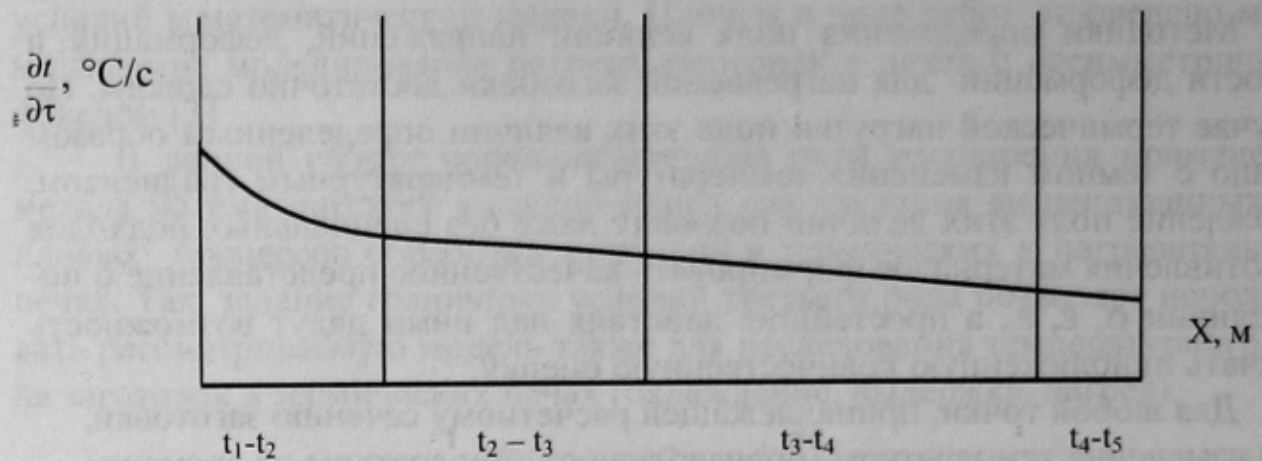


Рисунок 1 – Диаграмма темпа изменения температуры по толщине заготовки для некоторого момента времени

Таким образом, в работе предложены подходы, позволяющие получить дополнительную информацию при использовании метода математического моделирования:

– заложена идея о возможности предварительного анализа напряженно-деформированного состояния обрабатываемой заготовки на основе поля темпа изменения температуры, что позволит соответствующим образом корректировать параметры нагрева и охлаждения;

– дополнительная возможность использования темпа изменения температуры заключается в анализе влияния тепловых параметров разлива на фазовые преобразования в массиве металла и, таким образом, может содержать основы целенаправленного управления микроструктурой.

Список литературы

1. Тайца Н. Ю. Технология нагрева стали. – М.: Металлургия, 1962. – 568 с.
2. Гинкул С.И., Шелудченко В.И., Кравцов В.В. Вопросы тепло- и массообмена в материалах, нагрева и охлаждения металла: Учебн. пособие. – Донецк: РИА ДонГТУ, 2000. – 162 с.

Надійшла до редколегії 12.05.2009.

О. Б. БІРЮКОВ, В. В. КРАВЦОВ
ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

A. B. BIRUKOV, V. V. KRAVTSOV
SHSI «Donetsk National Technical University»

Вдосконалення підходів до дослідження теплових процесів нагріву і термообробки заготовок на основі методу математичного моделювання. Розглянуто перспективи використання методу математичного моделювання для вивчення температурного стану заготовки при операціях нагріву і термообробки, показані додаткові можливості порівняння з аналогами.

математичне моделювання, температурний стан заготовки, нагрів, термообробка

Development of subways for heating and heat treatment thermal processes research on the basis of mathematical simulation method. Prospects of mathematical simulation method use for study of ingot heat state during operations of heating and heat treatment are considered, additional options as compared with analytical methods are shown.

mathematical simulation, ingot heat state, heating, heat treatment

© А. Б. Бирюков, В. В. Кравцов, 2009