

2. Гуринович, В.А. Регулируемое охлаждение заготовок в процессе горячего формообразования деталей автомобиля / В.А. Гуринович, П.С. Гурченко, А.И. Михлюк // Автомобильная промышленность. – 2007. – № 4. – С. 27–29.

3. Гурченко, П.С. Резервы энергосбережения при термической обработке поковок деталей автотехники МАЗ с индукционного нагрева / П.С. Гурченко, А.А. Солонович // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 7-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 23-24 мая: в 3 т. / Белорус. национ. техн. ун-т. – Минск, 2009. – Т. 1. – С. 259–260.

4. Материаловедение / А.М. Адашкин [и др.]; под ред. Ю.М. Соколоменцева. – М.: Высш. шк., 2005. – 456 с.

5. Гуляев, А.Л. Металловедение / А.Л. Гуляев. – М.: Metallurgia, 1986. – 544 с.

6. Смагоринский, М.Е. Термопластическая обработка металлов в условиях циклически изменяющихся температур / М.Е. Смагоринский. – М.: Metallurgia, 1992. – 254 с.

7. Ящерицын, П.И. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах: учеб. для вузов / П.И. Ящерицын. – М.: Высш. шк., 1990. – 512 с.

8. Колосков, М.М. Марочник сталей и сплавов / М.М. Колосков, Е.Т. Долбенко, Ю.В. Каширский. – М.: Машиностроение, 2001, – 672 с.

УДК 669.041

И.А. ТРУСОВА, д-р техн. наук,
П.Э. РАТНИКОВ, канд. техн. наук,
Д.В. МЕНДЕЛЕВ (БНТУ)

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И АЛГОРИТМА РАСЧЕТА НАГРЕВА СТАЛИ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧАХ

Теплотехнология производства стальных изделий на металлургических и машиностроительных предприятиях включает различ-

ные виды тепловой обработки: нагрев до температуры приобретения изделиями пластических свойств, отжиг, закалка, нормализация и т.д. Очевидно, что для управления этими способами тепловой обработки стальных изделий необходима разработка методов моделирования и соответствующих алгоритмов расчетов.

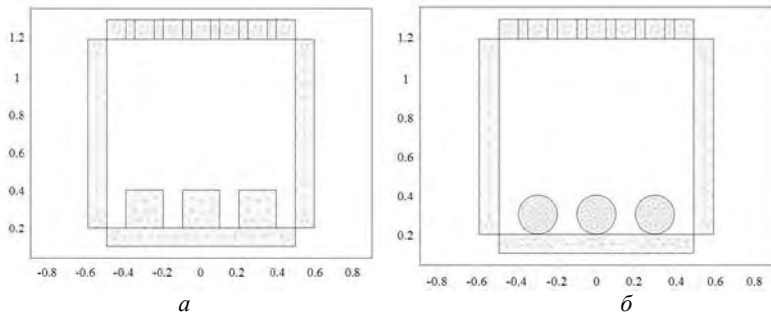
В данной статье предложены методики расчета нагрева стальных заготовок различной формы (призма и круг) с граничными условиями III рода с учетом термической чувствительности материалов.

В качестве инструмента решения поставленных задач был использован универсальный метод — метод конечных элементов (МКЭ) (в качестве конечного элемента выбран треугольник) [1–3].

Использование МКЭ в силу его универсальности позволяет создавать обширные пакеты прикладных программ для расчетов тепловых процессов в телах сложной геометрии и сложных составных телах. Использование метода конечных элементов в нестационарном случае сводит решения уравнения в частных производных к решению системы обыкновенных дифференциальных уравнений.

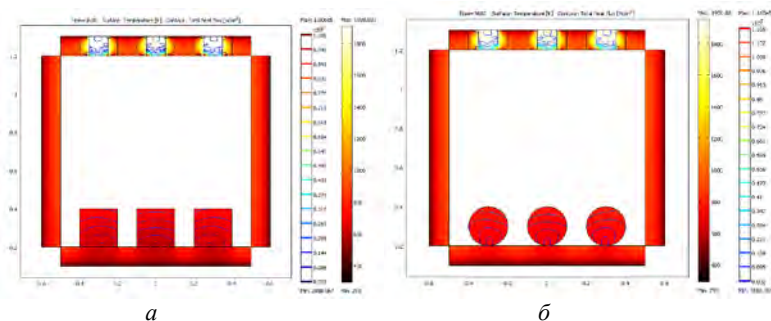
Конструктивно большинство проходных нагревательных печей выполнены в виде длинного коридора (это утверждение касается и кольцевых печей, если их рабочее пространство развернуть), по которому перемещаются нагреваемые заготовки при помощи различных механизмов (толкатели, механизмы шагания пода, вращающаяся подина и др.). При моделировании радиационного теплообмена (при определении угловых коэффициентов, переотражения тепловых потоков и т.д.) можно рассматривать небольшую (вырезанную) часть рабочего пространства, рассматривая «обрезанные» торцевые стороны как зеркальные поверхности (степень черноты этих стенок задается равной 0).

Схема расчетной области при нагреве призматических (сечением 200×200 мм) и цилиндрических заготовок (диаметром 200 мм) из легированной стали (20ХН3А) приведена на рисунке 1, а температурное поле и изолинии тепловых потоков системы приведены на рисунке 2.



a – призматические заготовки; *б* – цилиндрические заготовки

Рисунок 1 – Расчетная область при моделировании процесса нагрева с граничными условиями III рода



a – призматические заготовки; *б* – цилиндрические заготовок

Рисунок 2 – Температурное поле и изолинии тепловых потоков системы при нагреве

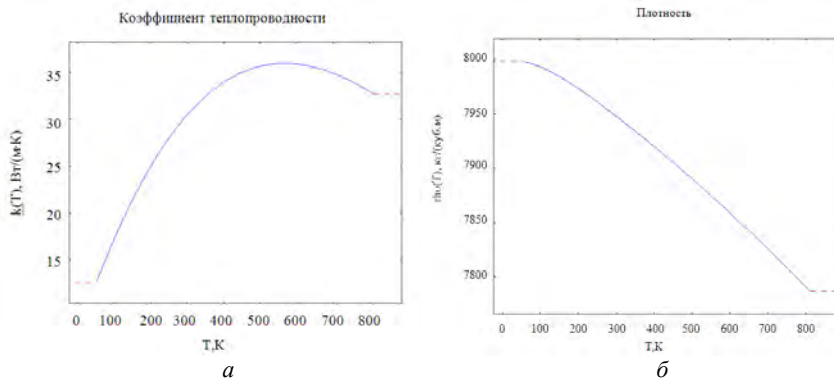
В высокотемпературных пламенных нагревательных печах основную роль в суммарном теплообмене играет радиационная составляющая. Таким образом, точность расчета температурных полей рабочего пространства печи и нагреваемого изделия будет связана, прежде всего, с корректностью расчета характеристик переноса излучения.

Математическая модель нагрева заготовок при граничных условиях III рода с учетом переменной теплофизики [4] имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho(T)\tilde{n}_p \frac{\partial T_i}{\partial t} + \nabla(-k(T)\nabla T_i) = Q + q_s T_a \\ T_0 = T_i(t_0) \\ -n(-k(T)\nabla T_i) = \varepsilon(G_i - \sigma T_i^4) \\ (1 - \varepsilon)G_i = J_{0i} - \varepsilon\sigma T_i^4 \end{array} \right. ,$$

где $k(T)$ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); c_p – изобарная теплоемкость, Дж/(кг·К); T_r – температура газовой среды, К; T_i – температура i -й границы заготовки, К; $n(-k(T)\nabla T_i)$ – нормальная составляющая потока теплопроводности от i -й границы заготовки, Вт/м²; $\rho(T)$ – плотность, кг/м³; Q – источник тепла, Вт/м³; q_s – коэффициент десорбции/абсорбции, Вт/(м³·К); ε – степень черноты заготовки; σ – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м²·К⁴); $(1 - \varepsilon)G_i$ – плотность отраженного излучения i -й границы заготовки, Вт/м²; J_{0i} – плотность эффективного излучения i -й границы заготовки, Вт/м²; $\varepsilon\sigma T_i^4$ – плотность собственного излучения i -й границы заготовки, Вт/м²; εG_i – плотность поглощенного излучения заготовкой через i -ю границу, Вт/м².

Функциональные зависимости теплофизических параметров для данной марки стали 20ХН3А приведены на рисунке 3. Коэффициент изобарной теплоемкости стали принят равным 385 Дж/(кг·К).

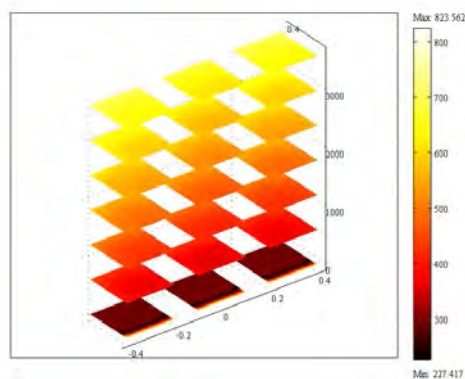


a – коэффициент теплопроводности; b – плотность

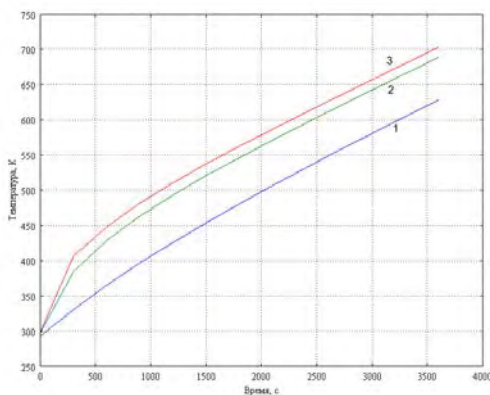
Рисунок 3 – Температурные зависимости теплофизических свойств стали 20ХН3А

На рисунке 4 показаны температурное поле и динамика температур в характерных точках призматической заготовки сечением 200×200 мм из легированной стали 20ХН3А, а на рисунке 5 – то же, в цилиндрической заготовке.

Адекватность предложенной математической модели показана авторами в работах [4–6]. Таким образом, предложенная методика может быть использована при моделировании теплообменных процессов в нагревательных печах различных конструкций металлургического и машиностроительного производств с целью совершенствования температурно-тепловых режимов их работы.



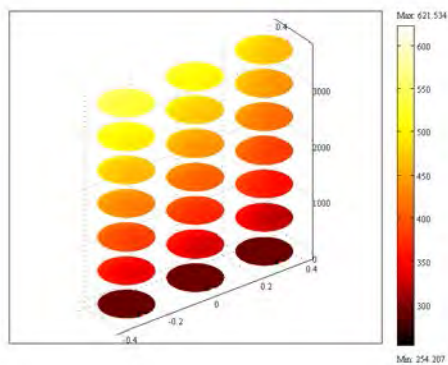
a



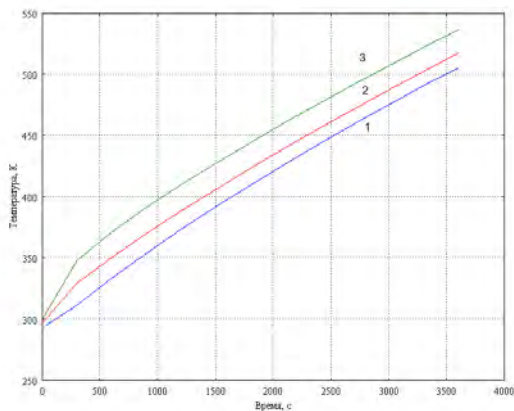
б

a – температурное поле; *б* – температура центра (1), грани (2) и ребра (3)

Рисунок 4 – Зависимость температурного поля призматической заготовки от времени



a



б

a – температурное поле; *б* – температура центра (2), нижней (1) и верхней (3) поверхности

Рисунок 5 – Зависимость температурного поля сечения цилиндра от времени

Литература

1. Галлагер, Р. Метод конечных элементов. Основы / Р. Галлагер; пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 428 с.

2. Деклу, Ж. Метод конечных элементов: пер. с франц. / Ж. Деклу. – М.: Мир, 1976. – 96 с.

3. Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация: пер. с англ. / О. Зенкевич, К. Морган. – М.: Мир, 1986. – 318 с.

4. Трусова, И.А. Математическое моделирование процессов радиационно-конвективного теплообмена при нагреве стальных заготовок в методических проходных печах / И.А. Трусова, Д.В. Менделев, П.Э. Ратников // Литье и металлургия. – 2010. – № 3 (Спецвыпуск). – С. 169–172.

5. Трусова, И.А. Математическое моделирование теплообменных процессов в топливных нагревательных печах камерного типа / И.А. Трусова, П.Э. Ратников // Литье и металлургия. – 2010. – № 4. – С. 194–198.

6. Трусова, И.А. Математическое моделирование и оптимизация способов нагрева заготовок в камерных печах / И.А. Трусова, П.Э. Ратников, Д.В. Менделев // Литье и металлургия. – 2010. – № 4. – С. 190–194.

УДК 669.04

С.В. КОРНЕЕВ, канд. техн. наук (БНТУ)

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИЙ СИСТЕМ ДЫМОУДАЛЕНИЯ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ КОНВЕЙЕРНОГО ТИПА

Термическая обработка окончательно формирует комплекс физико-механических свойств, который определяет эксплуатационные характеристики изделий. В связи с этим при проектировании новых печей, при реконструкции и эксплуатации действующих возникает важная задача оптимизации их конструкций и тепловых режимов с целью создания условий для обеспечения всех требований технологического режима при экономии топливно-энергетических ресурсов.

Процесс нагрева заготовок в топливных печах, работающих на газообразном топливе, определяется передачей теплоты от грею-