



Influence of pressure of gas phase, irradiation, physical and mechanical and electro-physical ways of influence on intensification of diffused processes of oxides deoxidation is examined.

А. Н. ЧИЧКО, В. Ф. СОБОЛЕВ, О. И. ЧИЧКО, С. Г. ЛИХОВУЗОВ, О. А. САЧЕК, БНТУ

УДК 669.27:519

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИЗДЕЛИЙ СО СЛОЖНОЙ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРОЙ

Операция термической обработки деталей является важнейшим этапом технологического процесса, включающим изменение структурно-чувствительных свойств деталей под действием различных температурно-временных режимов. Основные режимы термической обработки изделия – это температура и время, которые изменяются при заданном законе температуры печи [1]. При этом имеется ряд дополнительных характеристик, определяющих структурное состояние нагреваемого объекта. Например, максимальная температура, до которой нагревается объект, время выдержки объекта при одной или нескольких температурах, скорости нагрева объекта и скорости его охлаждения. Основной целью термической обработки является получение необходимой структуры и свойств материала [2].

При термической обработке под действием температур происходят не только структурные превращения, но изменяются деформационные характеристики детали. В результате этого в детали возникают внутренние трещины, образование которых связано с тепловой энергией, затрачиваемой на нагрев, приводящий к неоднородному распределению температуры в различных точках объема детали. В результате этого в разных элементах объекта возникает температурный перепад (градиент температуры), который является причиной термических напряжений [3]. Неоднородность температурного поля приводит к различному расширению и сжатию отдельных элементов объема детали. Следует отметить, что внутренние напряжения могут усугубляться неоднородностями химического состава, вследствие чего в разных точках объекта, находящегося в печи, возникают дополнительные температурные градиенты.

Проблемам управления процессами термической обработки посвящено большое количество

работ [4–6]. При этом ключевым вопросом является оптимизация выбора температурных режимов с учетом конкретного материала и конкретной конфигурации детали.

В классической теории нагрева различают нагрев тонких и массивных тел, используя при этом критерий Био, являющийся отношением количества тепла, полученного поверхностью объекта, и количеством тепла, отведенного внутрь [7]:

$$Bi = \frac{\alpha}{\lambda} X, \quad (1)$$

где Bi – критерий Био; α – коэффициент теплообмена на поверхности тела, ккал/(м²·ч·°С); λ – коэффициент теплопроводности материала, ккал/(м·ч·°С); X – характерный размер тела (половина толщины плоской стенки, радиус цилиндра или шара), м.

При больших значениях критерия Био процесс теплопередачи на поверхность от среды происходит интенсивнее, чем отвод тепла внутрь объекта. При этом возникают большие градиенты между температурами поверхности и температурами внутренних точек объекта. При малых значениях критерия Био температурный градиент уменьшается, а значит, уменьшаются температурные напряжения в процессе термообработки. Условно разделяют тонкие тела, у которых критерий $Bi < 0,25$, и массивные тела, у которых $Bi > 0,5$. Имеется переходная область для критерия Био с интервалом (0,25; 0,5), которая соответствует смешанному случаю тонкого и массивного тел. Из соотношения (1) видно, что определение величины X для объекта со сложной внутренней структурой, т. е. имеющей различные варианты толщины стенок, является сложной задачей. Поэтому вместо X вводят функцию поверхности $S(R)$, которая характеризует усредненную внутреннюю структуру объекта.

Причем каких-либо строгих обоснованных правил вычисления функции $S(R)$ пока в литературе нет.

Иногда для определения температурно-временных режимов используют систему уравнений [7]:

$$\begin{cases} \tau_{\text{нагр}} = \frac{V \rho c}{F \alpha} \ln \frac{T_{\text{печи}} - T_0}{T_{\text{печи}} - T_{\text{кон}}}, \\ T_{\text{кон}} = (T_{\text{печи}} - T_0) \left(1 - e^{-\frac{\alpha F}{Gc}} \right) + T_0, \end{cases} \quad (2)$$

где $V, \rho, c, T_0, T_{\text{кон}}$ – соответственно объем, плотность, теплоемкость, начальная и конечная температуры нагреваемой детали; G – масса объекта, кг; F – параметр пространственной конфигурации объекта; $T_{\text{печи}}$ – температура печи.

Из системы (2) можно видеть, что конфигурация детали практически не учитывается, так как F – трудноопределимая величина, не учитывается также возможность изменения температуры печной среды. Следует отметить, что при переходе к практике термической обработки используют другие характеристики, связанные с временем нагрева и размерами печи [8]:

$$F_{\text{пода}} = \frac{Af_{\text{м}}}{Gk_{\text{пода}}} \tau_{\text{нагр}}, \quad (3)$$

где $F_{\text{пода}}$ – площадь пода печи, занятая металлом, м^2 ; A – часовая производительность печи, кг/ч ; $f_{\text{пода}}$ – проекция нагреваемого объекта на под, м^2 ; $k_{\text{пода}}$ – коэффициент загрузки пода, определяемый через отношение проекции объекта на под к общей поверхности пода.

Из соотношения (3) можно оценить некоторые характеристики печи по заданному времени необходимого нагрева, если имеются эмпирические данные $k_{\text{пода}}$.

Таким образом, из анализа формул (2)–(3) можно сделать вывод, что они усредненно характеризуют процессы, происходящие при нагреве объекта. И поэтому обоснованный выбор режимов термической обработки для деталей сложной конфигурации требует новых подходов. Следует отметить, что в справочных пособиях и научно-технической литературе встречаются и другие формулы, по которым можно выбирать режимы термической обработки изделий. Однако практически все они не учитывают пространственное распределение детали и часто «работающие» термические режимы для конкретных изделий далеки от оптимальных условий. Поэтому в заводской практике мы имеем часто необоснованные с энергетической точки зрения режимы, закладываемые в себестоимость деталей.

Эффективным инструментом, позволяющим получить большое количество информации о процессах, протекающих в системе «деталь-печь», является метод математического моделирования процессов нагрева и охлаждения. Этот метод основан на использовании уравнения теплопроводности, которое позволяет учесть пространственные особенности детали, даже в случае изменяющихся во времени температурных режимах печи. Уравнение теплопроводности, включающее в себе связь пространства, времени и температуры [9], имеет вид

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial E^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (4)$$

где $T = f(x, y, z, \tau)$ – температурное поле, определяющее значения температуры в любой точке объекта (x, y, z) для момента времени τ ; a – коэффициент температуропроводности, равный $\frac{\lambda}{c\rho}$, $\text{м}^2/\text{с}$.

В общем случае величины λ, ρ и c являются функциями температуры и уравнение можно записать в виде:

$$\begin{aligned} c(T)\rho(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} &= \frac{\partial}{\partial E} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial E} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) &+ \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \\ &+ q(E, y, z, \tau), \end{aligned} \quad (5)$$

где $q(x, y, z, \tau)$ – функция тепловыделения, связанная со структурными и фазовыми превращениями.

Для определения температурного поля могут быть использованы граничные условия [10]:

$$T_{\text{пов}} = f(x_{\text{пов}}, y_{\text{пов}}, z_{\text{пов}}, \tau), \quad (6)$$

где $f(x_{\text{пов}}, y_{\text{пов}}, z_{\text{пов}}, \tau)$ – закон изменения температуры на поверхности объекта.

В частном случае $T_{\text{пов}} = \text{const}$. Для граничных условий III рода используется формула

$$\left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{\text{пов}} = -\frac{\alpha}{\lambda} (T_{\text{пов}} - T_0), \quad (7)$$

где $\frac{\partial T}{\partial n}$ – частная производная температуры по нормали.

Для исследования процессов нагрева и охлаждения сложных в пространственном отношении изделий был разработан метод численного моделирования процессов, использующий клеточно-автоматный подход [11, 12].

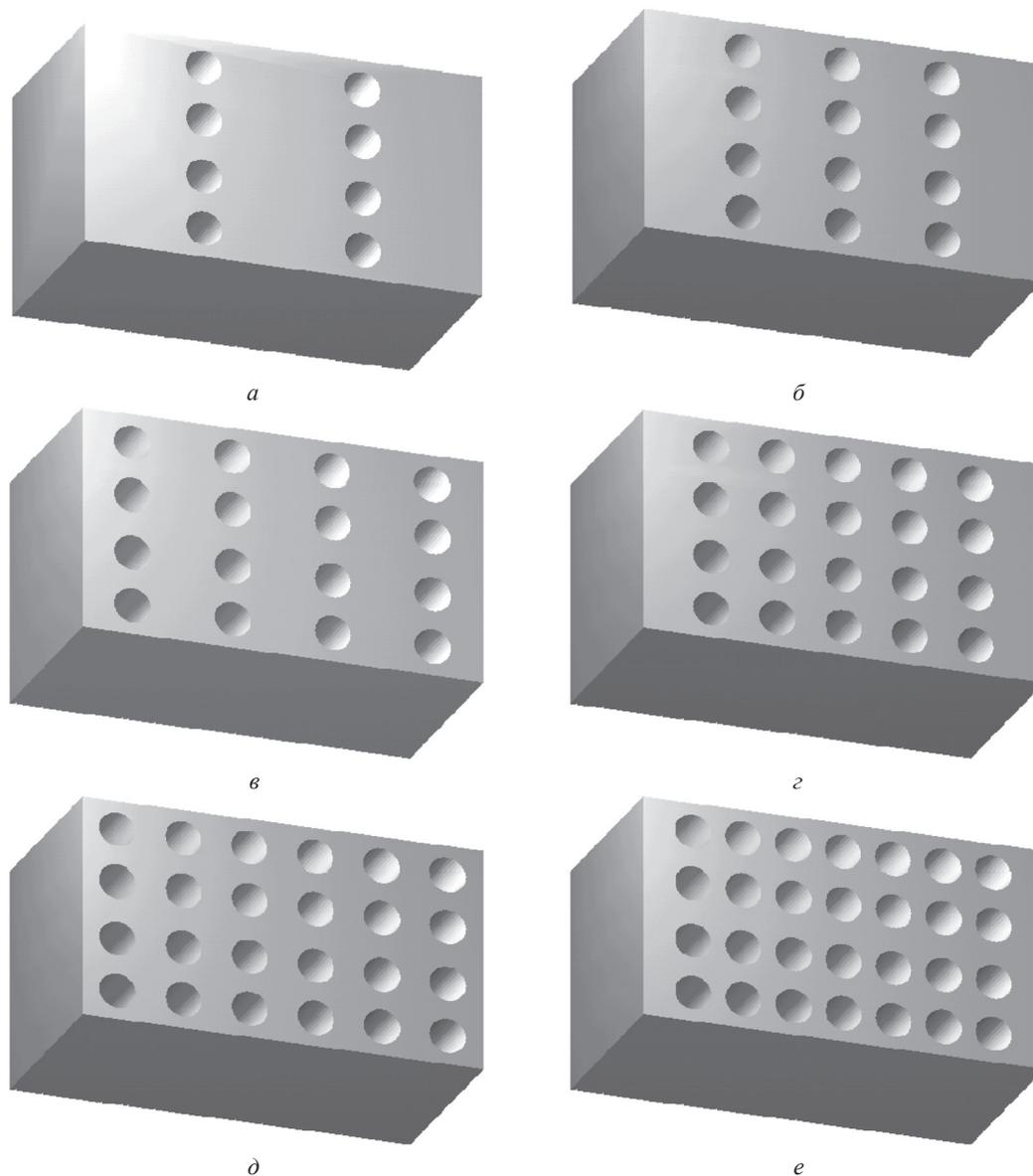


Рис. 1. Изображение 3d-объектов, используемых при моделировании процесса охлаждения, с различным количеством сквозных отверстий: *a* – 8; *б* – 12; *в* – 16; *г* – 20; *д* – 24; *е* – 28

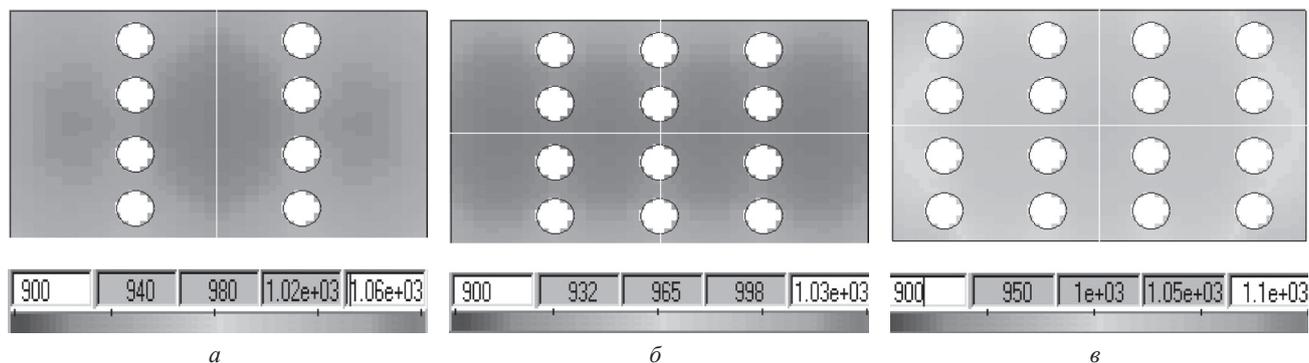


Рис. 2. Расчетное распределение температуры в момент времени $\tau = 900$ с: *a* – деталь с 8 отверстиями; *б* – с 12 отверстиями; *в* – с 16 отверстиями

Рассмотрим задачу моделирования температурного поля на деталях с различной внутренней геометрией.

Для решения этой задачи были построены электронные модели, имитирующие элементы пресс-

формы. В частности, использовали параллелепипед, имеющий различное количество внутренних отверстий (рис. 1). Для каждого из этих объектов было проведено моделирование процесса охлаждения. В качестве начальной температуры объекта

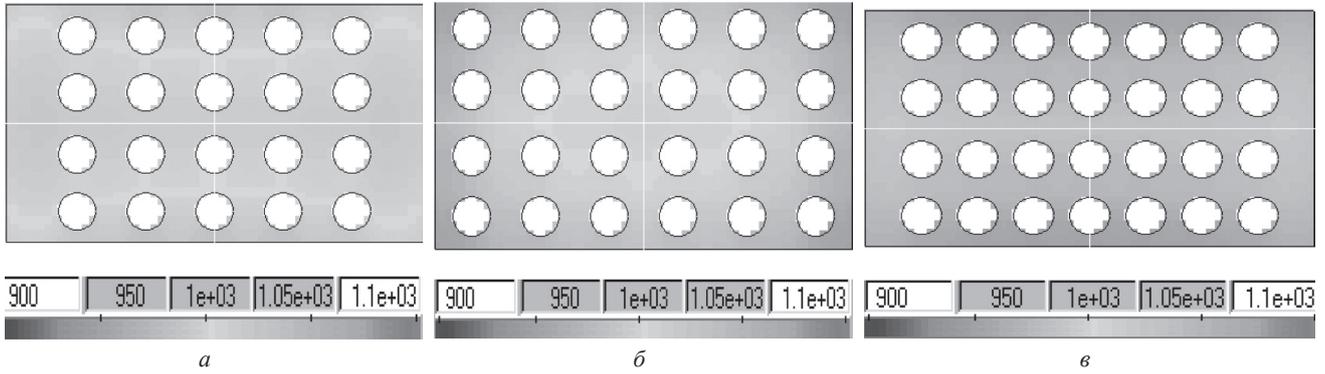


Рис. 3. Расчетное распределение температуры в момент времени $\tau = 900$ с: *a* – деталь с 20 отверстиями; *б* – с 24 отверстиями; *в* – с 28 отверстиями

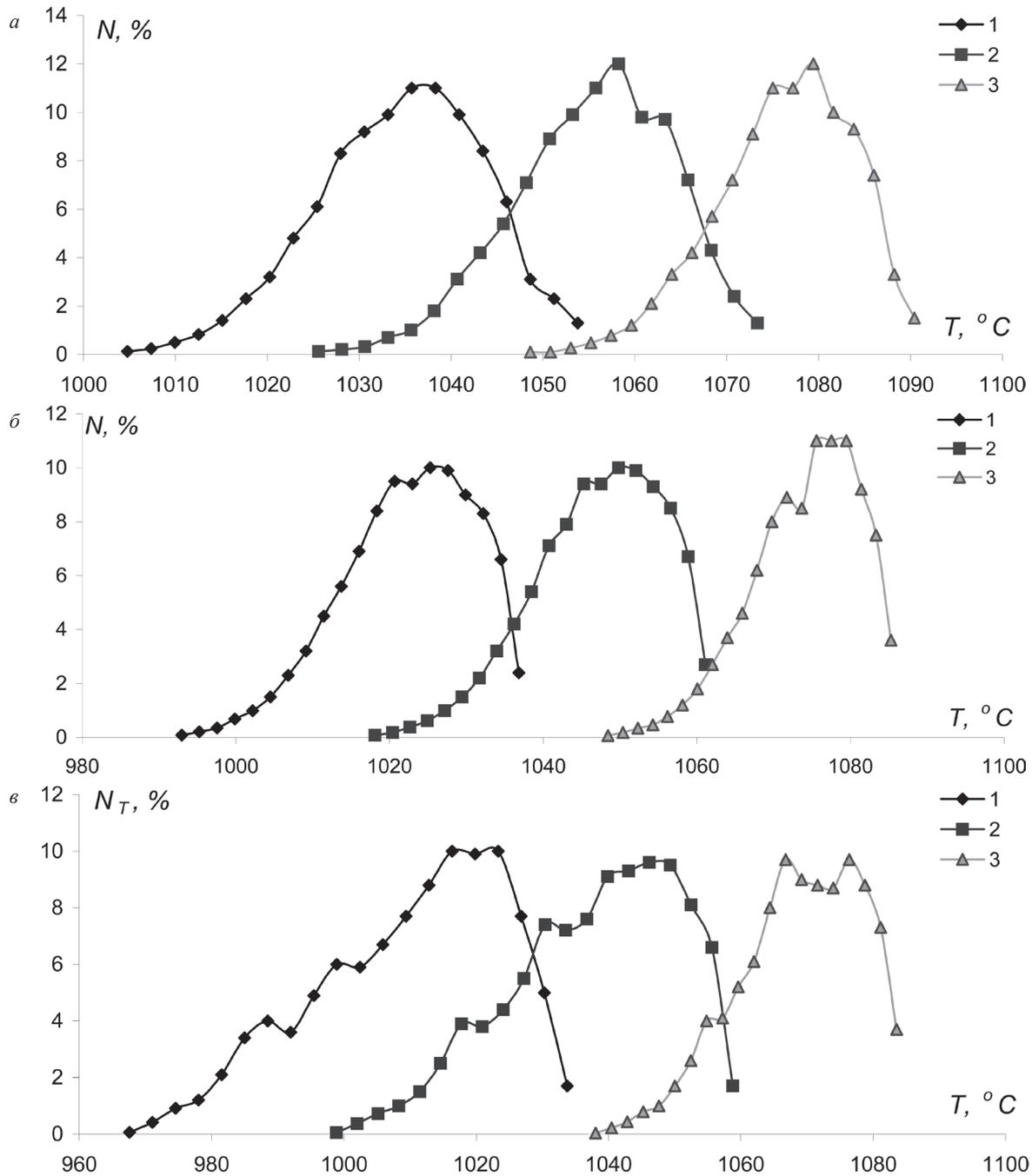


Рис. 4. Статистическое распределение температур $N_T(T(x, y, z); \tau)$ для различных 3d-объектов при разных временах охлаждения: 1 – $\tau = 900$ с; 2 – 600; 3 – 300 с; *a* – деталь с 8 отверстиями; *б* – с 12 отверстиями; *в* – с 16 отверстиями

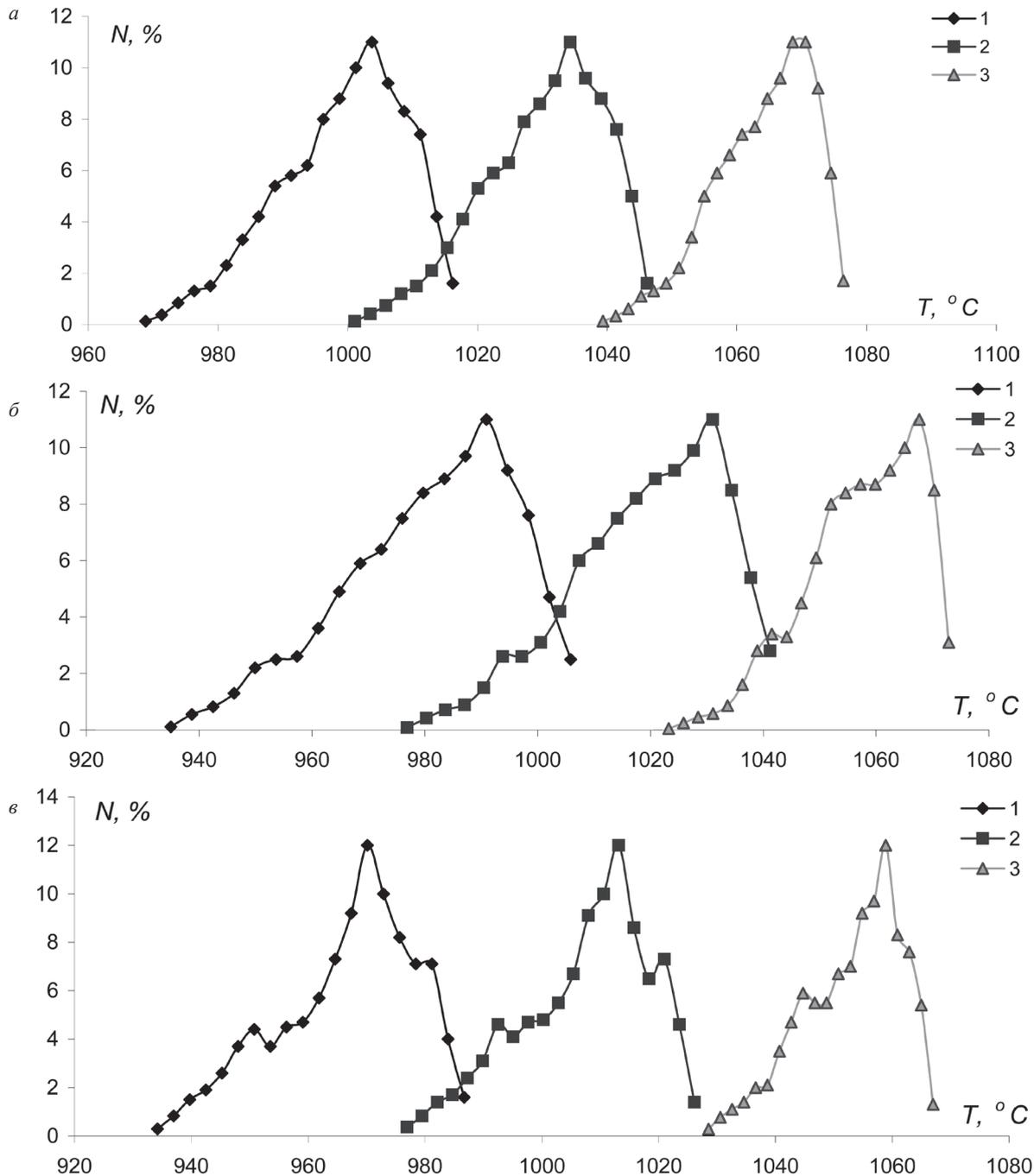


Рис. 5. Статистическое распределение температур $N_T(T(x, y, z); \tau)$ для различных 3d-объектов при разных временах охлаждения: 1 – $\tau = 900$ с; 2 – 600; 3 – 300 с; а – деталь с 20 отверстиями; б – с 24 отверстиями; в – с 28 отверстиями

использовали температуру $T = 1100$ °С, а температура среды составляла $T_{\text{ср}} = 20$ °С. Использовали марку стали 95X18 и соответствующие ей теплопроводность, теплоемкость, плотность, температуру структурного превращения аустенита в мартенсит.

На рис. 2, 3 приведены результаты расчета поля температур деталей, использованных при моделировании процесса охлаждения. Для общей оценки характера температурного поля была построена статистическая функция распределения температур $N_T(T(x, y, z, \tau); \tau)$, вычисленная для различных времен охлаждения (рис. 4–6). Фактически построен-

ная статистическая функция является интегральной характеристикой искусственного (расчетного) изображения температурных полей. Как видно из рисунков, функция $N_T(T(x, y, z, \tau); \tau)$ имеет вид гауссового контура, который с течением времени смещается в сторону низких температур. Причем гауссовые контуры могут, кроме главного максимума, иметь дополнительные, что в данном случае связано с числом отверстий и особенностями охлаждения. Если по оси абсцисс ввести критическую температуру перехода микроструктуры А в микроструктуру Б, то по этим кривым можно определить, произошло

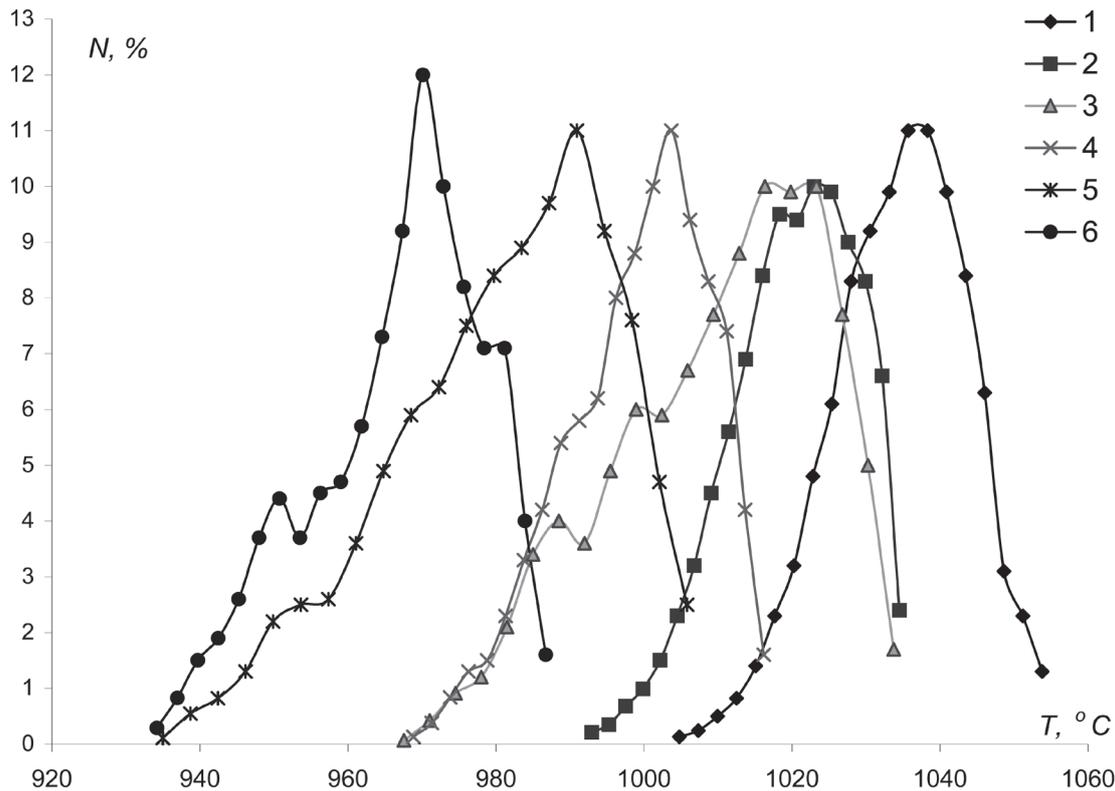


Рис. 6. Статистическое распределение температур $N_T(T(x, y, z); \tau)$ для 3d-объектов при времени охлаждения $\tau = 900$ с: 1 – деталь с 8 отверстиями; 2 – с 12 отверстиями; 3 – с 16 отверстиями; 4 – с 20 отверстиями; 5 – с 24 отверстиями; 6 – с 28 отверстиями

ли структурное превращение А→Б и в каком объеме элементов детали.

Таким образом, вычисленные методом моделирования статистические распределения температурных полей позволяют оценить степень протекания структурных превращений в любом про-

странственно распределенном объекте. Это открывает новые возможности для оценки качества проводимой термической обработки изделий. Данная методика является развитием информационных технологий в применении к задачам разработки режимов термической обработки изделий.

Литература

1. Гуляев А. П. Термическая обработка стали. М.: Машгиз, 1960.
2. Новиков И. И. Теория термической обработки металлов. М.: Металлургия, 1974.
3. Малинкин Е. И. Образование трещин при термической обработке стальных изделий. М.: Машиностроение, 1965.
4. Бутковский А. Г. Теория оптимального управления системами с распределенными параметрами. М.: Наука, 1965.
5. Бутковский А. Г., Малый С. А., Андреев Ю. Н. Оптимальное управление нагревом металла. М.: Металлургия, 1972.
6. Бутковский А. Г. Структурная теория распределенных систем. М.: Наука, 1977.
7. Григолюк З. И., Подстрикач Я. С., Бурак Я. И. Оптимизация нагрева оболочек и пластин. Киев: Наукова думка, 1979.
8. Скворцов А. А., Акименко А. Д., Кузелев М. Я. Нагревательные устройства. М.: Высш. шк., 1965.
9. Чичко А. Н., Яцкевич Ю. В. Трехмерное компьютерное моделирование охлаждения отливки и выбор питателя литниковой системы на основе уравнения теплопроводности // Инж.-физ. журн. 1999. Т. 72. С. 797–801.
10. Исаев С. И., Кожин И. А., Кофанов В. И. и др. Теория тепломассообмена / Под ред. А. И. Леонтьева. М.: Высш. шк., 1979.
11. Чичко А. Н., Яцкевич Ю. В., Соболев В. Ф. Трехмерное математическое моделирование термонапряженно-го состояния стальной детали // Литье и металлургия. 2001. № 4. С. 82–84.
12. Чичко А. Н., Дроздов Е. А., Чичко О. И. Трехмерное математическое моделирование термоупругих характеристик сплава в условиях многократных термических нагрузок // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэх. навук. 2002. № 2. С. 111–116.