



ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТА В ОБЪЕКТАХ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ПРИ ТЕПЛОМ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ

В. А. СТОРОЖЕНКО, С. Н. МЕШКОВ, А. А. ГАПТРАКИПОВ

Рассмотрен процесс выявления дефектов в объектах цилиндрической формы при тепловом неразрушающем контроле. Показано, что кривизна объекта контроля существенно влияет на параметры процесса: перепад температур над дефектом, время нагрева и время регистрации.

The paper considers the process of defect detection in objects of a cylindrical shape at thermal NDT. It is shown that the curvature of the object of control essentially affects the process parameters, namely temperature gradient above the defect, heating and recording time.

Препятствием для более широкого распространения теплового неразрушающего контроля (ТНК) является то, что этот метод применяется и основным для плоских изделий и объектов. В то же время, элементы конструкций авиакосмической техники, различные трубы и цилиндры, корпуса электродвигателей, сосуды Дьюара и многие другие изделия — объекты цилиндрической формы (ОЦФ) представляют определенную сложность для ТНК. Как показывает практика, для реализации ТНК такого класса объектов необходимо создание специализированных средств и методик контроля, основанных на результатах анализа тепловых процессов и механизма формирования сигнала от дефекта.

Постановка задачи. Основой для разработки методик и аппаратуры ТНК является теплофизическое моделирование объекта контроля, цель которого можно сформулировать следующим образом:

анализ влияния цилиндрической формы объекта на известные закономерности активного метода ТНК;

создание теоретического аппарата, позволяющего рассчитывать основные параметры процесса активного ТНК для ОЦФ (а именно: величину ожидаемого сигнала от дефекта ΔT , оптимальное значение времени нагрева τ_n и времени запаздывания τ_z и оценивать применимость метода к новым объектам контроля.

Построение теплофизической модели основано на следующих принципах:

обеспечение адекватности модели за счет учета реальных условий проведения активного теплового контроля (смена граничных условий, ограничение мощности воздействия, наличие разнотипных дефектов и т. д.);

упрощение ее структуры путем выявления и исключения несущественных деталей в описании объекта контроля;

максимальная универсализация модели, позволяющая охватить большинство потенциальных объектов цилиндрической формы.

Геометрическое и математическое описание модели. Геометрическое представление объекта контроля (ОК) изображено на рис. 1. На рис. 1, а представлена наиболее часто используемая в ТНК теплофизическая модель ОК в виде пластины [1]. На рис. 1, б показана предлагаемая теплофизическая модель в цилиндрической системе координат. Общим для моделей является использование смешанных и переменных граничных условий (ГУ), что отображает реальные условия контроля.

В предлагаемой модели существенным является учет ограничения на допустимую максимальную

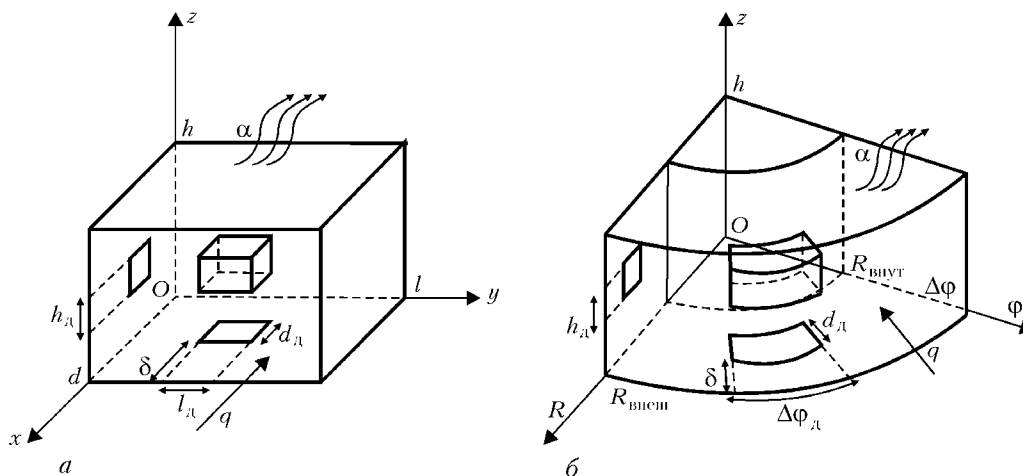


Рис. 1. Геометрические представления объектов контроля: прямоугольная (а) и цилиндрическая (б) модели

© В. А. Стороженко, С. Н. Мешков, А. А. Гаптракипов, 2004



температур объекта. Учет ограничения по $T_{\text{доп}}$ (допустимая температура нагрева образца) позволяет связать мощность q и время нагрева τ_n и с учетом этой связи определять наилучший для выявления дефекта режим проведения контроля.

Математическое описание модели основано на решении дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности [2]:

$$\nabla(\lambda \nabla T) = \nabla \lambda \nabla T + \lambda \nabla^2 T = c\rho \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

которое в цилиндрической системе координат имеет вид:

$$\begin{aligned} & \left(\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial \lambda}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\lambda}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \\ & + \left(\frac{\lambda}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial \lambda}{\partial \varphi} \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) + \\ & + \left(\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial \lambda}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} \right) = c\rho \frac{\partial T}{\partial t}. \end{aligned} \quad (2)$$

Решение осуществляется при граничных условиях 2- и 3-го рода:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{S_r} = q(r, \varphi, z, t), \quad (3)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{S_r} = \alpha(T(\vec{r}, t) \Big|_{S_r} - T_{\text{среды}}), \quad (4)$$

$$\lambda \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \varphi} \Big|_{S_\varphi} = \alpha(T(\vec{r}, t) \Big|_{S_\varphi} - T_{\text{среды}}), \quad (5)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{S_z} = \alpha(T(\vec{r}, t) \Big|_{S_z} - T_{\text{среды}}), \quad (6)$$

где S_r, S_φ, S_z — соответствующие осям координат внешние поверхности ОК [3].

В модели предусмотрено задание многослойных структур и введение двух и более дефектов. Теплофизические параметры области объекта могут быть выбраны произвольно, что обеспечивает возможность комбинаций любых материалов и веществ в модели.

Принятые в модели упрощения введены для обеспечения универсальности и для повышения быстродействия работы программы, реализующей эту модель. К ним следует отнести однородность теплофизических свойств рассматриваемых областей ОЦФ и независимость теплофизических характеристик от температуры (линейность модели).

Задачи анализа модели и методика его проведения. Для решения дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности использовали численный метод конечных разностей. Реализована неявная схема, обеспечивающая безусловную сходимость метода к точному решению. При этом применен метод переменных направлений.

Для рассматриваемой модели необходимо получить конечно-разностную аппроксимацию дифференциального уравнения (2) с разрывными коэффициентами ТФХ. Эта задача решена с помощью учета граничных условий между областями с различными ТФХ, которые определялись тре-

бованиями непрерывности температурного поля $T(r, \varphi, z, t)$ и теплового потока:

$$T'_i = T'_{i+1}, \quad \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial r_{ni}} = \lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial r_{ni+1}}, \quad (7)$$

где i — индекс ячейки.

При рассмотрении процесса распространения теплового потока по радиусу объекта контроля конечно-разностная аппроксимация строилась из следующего приближения дифференциального оператора для i -й ячейки:

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial \lambda}{\partial r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\lambda}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \approx \frac{1}{V_i} (q_{\text{вх}} - q_{\text{вых}}) [\text{Вт}/\text{м}^3]. \quad (8)$$

Воспользовавшись условием (7) и представлением радиальной составляющей тепловых потоков (8), получаем следующую неявную конечно-разностную аппроксимацию дифференциального уравнения (1):

$$\begin{aligned} & \frac{r_{i-1}}{r_i \Delta r_i + \frac{1}{2} \Delta r_i^2} \frac{2G_i R_i R_{i-1}}{R_i + R_{i-1}} T_{i-1}^{t+\Delta t} - \\ & - \left(1 + \frac{r_{i-1}}{r_i \Delta r_i + \frac{1}{2} \Delta r_i^2} \frac{2G_i R_i R_{i-1}}{R_i + R_{i-1}} + \frac{r_{i+1}}{r_i \Delta r_i + \frac{1}{2} \Delta r_i^2} \frac{2G_i R_{i+1} R_i}{R_{i+1} + R_i} \right) \times \\ & \times T_i^{t+\Delta t} + \frac{r_{i+1}}{r_i \Delta r_i + \frac{1}{2} \Delta r_i^2} \frac{2G_i R_{i+1} R_i}{R_{i+1} + R_i} T_{i+1}^{t+\Delta t} = -T_i^t. \end{aligned} \quad (9)$$

Для граничного условия второго рода (нагрев поверхности ОЦФ тепловым потоком q) получаем:

$$\begin{aligned} & - \left(1 + \frac{r_{k2}}{r_{k1} \Delta r_{k1} + \frac{1}{2} \Delta r_{k1}^2} \frac{2G_{k1} R_{k1} R_{k2}}{R_{k2} + R_{k1}} \right) T_{k1}^{t+\Delta t} + \\ & + \frac{r_{k2}}{r_{k1} \Delta r_{k1} + \frac{1}{2} \Delta r_{k1}^2} \frac{2G_{k1} R_{k1} R_{k2}}{R_{k1} + R_{k2}} T_{k2}^{t+\Delta t} = \\ & = -T_{k1}^t - \frac{G_{k1} r_{k1} q}{r_{k1} \Delta r_{k1} + \frac{1}{2} \Delta r_{k1}^2}. \end{aligned} \quad (10)$$

Граничное условие третьего рода (теплообмен со средой):

$$\begin{aligned} & \frac{1}{r_{k1} \Delta r_{k1} + \frac{1}{2} \Delta r_{k1}^2} \times \\ & \times \left(- \left(1 + \frac{2r_{k1} G_{k1} R_{k1} \alpha}{2R_{k1} + \alpha} + \frac{2r_{k2} G_{k1} R_{k2} R_{k1}}{R_{k2} + R_{k1}} \right) T_{k1}^{t+\Delta t} + \right. \\ & \left. + \frac{2r_{k2} G_{k1} R_{k2} R_{k1}}{R_{k2} + R_{k1}} T_{k2}^{t+\Delta t} \right) = \\ & = -T_{k1}^t - \frac{r_{k1}}{r_{k1} \Delta r_{k1} + \frac{1}{2} \Delta r_{k1}^2} \frac{2G_{k1} R_{k1} \alpha}{2R_{k1} + \alpha} T_{\text{среды}} \end{aligned} \quad (11)$$

Для внутренней поверхности $k1 = 0, k2 = 1$; для внешней — $k1 = n, k2 = n - 1$.



Для азимутальной оставляющей теплового потока получим одномерное дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности:

$$\frac{\lambda}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial \lambda}{\partial \varphi} \frac{\partial T}{\partial \varphi} = c\rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad [\text{Вт}/\text{м}^3]. \quad (12)$$

В результате преобразований, аналогичных предыдущим, получим следующие формулы конечно-разностной аппроксимации:

$$\frac{1}{\Delta\varphi_j(r_i + \frac{1}{2}\Delta r_i)^2} \times \left(\frac{2G_j R_j R_{j-1}}{R_j + R_{j-1}} T_{j-1} - \left(1 + \frac{2G_j R_j R_{j-1}}{R_j + R_{j-1}} + \frac{2G_j R_{j+1} R_j}{R_{j+1} + R_j} \right) \times \right. \\ \left. \times T_j + \frac{2G_j R_{j+1} R_j}{R_{j+1} + R_j} T_{j+1} = -T_j, \quad (13)$$

где $R_j = \lambda_j / \Delta\varphi_j$.

Граничное условие третьего рода (теплообмен со средой):

$$\frac{1}{\Delta\varphi_{k1}(r_i + \frac{1}{2}\Delta r_i)^2} \left(- \left(1 + \frac{2G_{k1} R_{k1} \alpha}{2R_{k1}} + \frac{2G_{k1} R_{k2} R_{k1}}{R_{k2} + R_{k1}} \right) \times \right. \\ \left. \times T_{k1}^{t+\Delta t} + \frac{2G_{k1} R_{k2} R_{k1}}{R_{k2} + R_{k1}} T_{k2}^{t+\Delta t} \right) = \\ = -T_{k1}^t - \frac{2G_{k1} R_{k1} \alpha}{2R_{k1} + \alpha} T_{\text{среды}} \\ r_i + \frac{1}{2}\Delta r_i \quad (14)$$

Для распространения тепловых потоков по оси OZ конечно-разностная схема совпадает со схемой в декартовой системе координат.

Для реализации описанного выше численного метода разработана компьютерная программа «Cylinder» для расчета алгоритма температурных полей и оптимизации основных параметров АТНК.

Полученные в результате расчета температурные поля позволяют определить максимальное значение температуры T_{max} и в соответствии с учетом ограничения $T_{\text{max}} \leq T_{\text{доп}}$ (допустимая температура нагрева) соответственно пропорционально изменить q_{max} в $T_{\text{доп}}/T_{\text{max}}$ раз, с тем, чтобы с одной стороны, не превысить ограничения, а с другой — получить максимальный тепловой отклик от дефекта.

Как известно, нагрев в тепловом контроле осуществляется прямоугольным импульсом с мощностью нагрева q_0 и длительностью τ_n . Поэтому в модели предусмотрена возможность получения отклика на этот импульс как суперпозиции «положительной» и «отрицательной» тепловых ступенек, смещенных по времени на величину τ_n . Это позволило значительно ускорить процедуру анализа модели и выбора оптимального режима ТНК.

Условия вычислительного эксперимента.

Постановка задачи теплофизического моделирования ОЦФ предусматривает получение ответов на следующие вопросы:

справедливы ли закономерности активного метода теплового контроля, известные для объектов типа пластины, для объектов цилиндрической формы?

как влияет форма объекта контроля (его кривизна) на такие параметры, как сигнал от дефекта ΔT , оптимальные параметры процедуры контроля τ_n и τ_3 ?

каков характер зависимости сигнала от дефекта ΔT и параметров дефекта — глубины залегания h , раскрытия δ , поперечного размера L .

Для ответа на перечисленные вопросы в качестве варьируемых факторов рассматривались: радиус кривизны объекта; глубина залегания дефекта; поперечный размер дефекта L (4, 12 и 20 мм).

Кроме варьируемых факторов были учтены и фиксированные, которые хоть и влияют на процедуру контроля, но не столь существенны. Численные значения фиксированных факторов были выбраны для наиболее типичного объекта теплового контроля — композиционных структур из стекло- и углепластиков, для которых [1]: $\lambda = 0,336 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $a = 1,492 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$; допустимая температура нагрева $T_{\text{доп}} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$.

Толщина стенки была принята равной 10 мм, а в качестве дефекта рассматривалось воздушное включение (расслоение, непроклей) с теплофизическими параметрами [4]: $\lambda_d = 0,03 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $a_d = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$.

Для анализа влияния формы объекта (его кривизны) на исследуемые закономерности расчеты, проводимые на основании разработанной цилиндрической модели, сравнивались с аналогичными данными, полученными с помощью прямоугольной (ортогональной) модели (рис. 1, а).

Результаты анализа модели. Машинный эксперимент показал, что общие закономерности ТНК, полученные для объектов в виде плоскопараллельной пластины, выполняются и для ТНК ОЦФ. В частности, существует оптимальный (по критерию ΔT) режим контроля (т. е. время нагрева τ_n и время задержки τ_3). Однако значения этих параметров, как и величина сигнала ΔT для ОЦФ, отличаются от объекта прямоугольной формы (типа пластины). Причем эти отличия тем существеннее, чем меньше радиус кривизны и больше глубина залегания дефекта.

Характер полученных закономерностей в основном совпадает с известными, полученными ранее при использовании прямоугольной модели.

На рис. 2 показано влияние кривизны объекта на основные характеристики ТНК (ΔT , τ_n , τ_3) при фиксированных параметрах дефекта. Приведенные данные свидетельствуют о том, что отличие формы объекта от плоской (т. е. его кривизна) оказывает существенное влияние на характеристики ТНК.

При росте кривизны объекта (уменьшении R) значения величины сигнала от дефекта ΔT , а также оптимальных параметров режима контроля τ_n и τ_3 отличаются от значений, характерных для плоских объектов более, чем на 70 %.

Это подтверждает предположение о том, что к ТНК объектов цилиндрической формы необходим

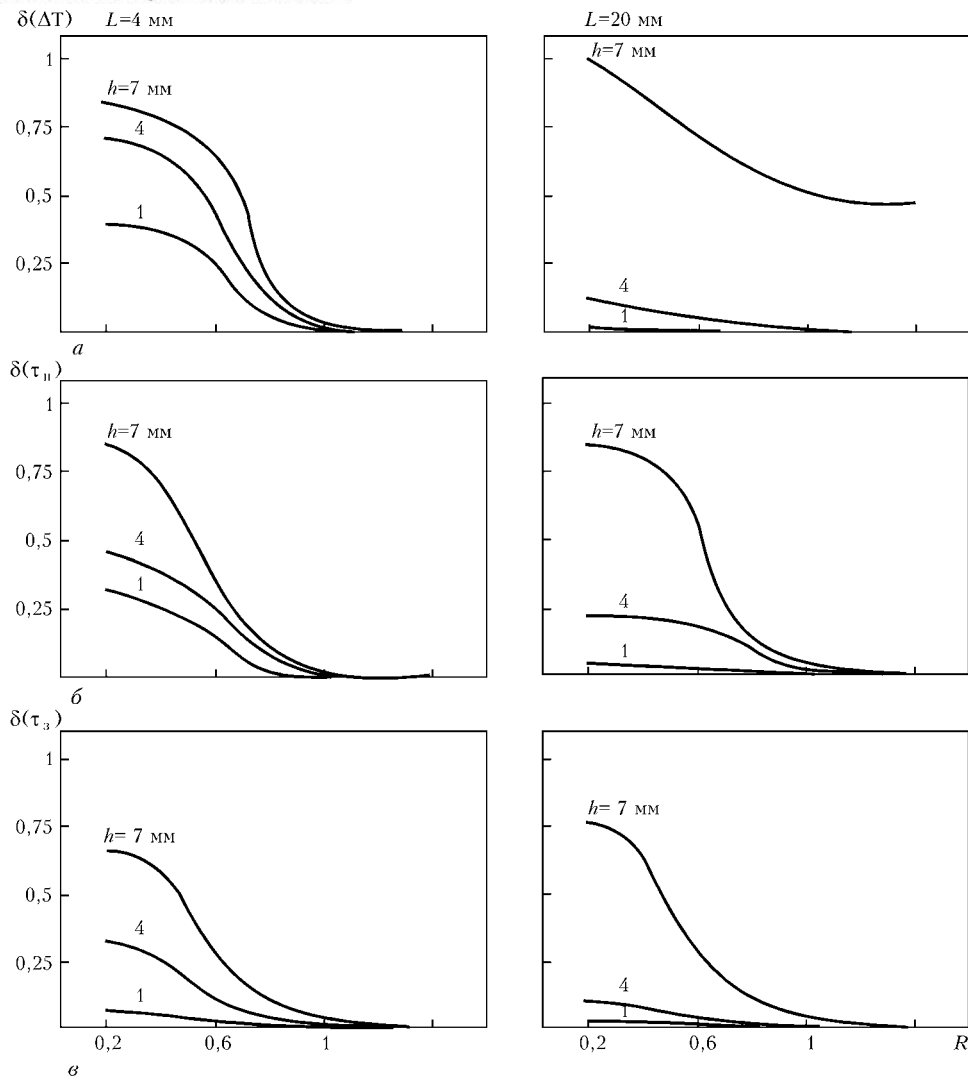


Рис. 2. Зависимости основных параметров контроля ΔT (а); τ_n (б); τ_z (в) от радиусов кривизны объекта: $d(\Delta T) = \Delta T_{\text{цпл}} - \Delta T_{\text{пр}} / \Delta T_{\text{пр}}$; $(\delta\tau_n) = \tau_{n\text{цпл}} - \tau_{n\text{пр}} / \tau_{n\text{пр}}$; $(\delta\tau_z) = \tau_{z\text{цпл}} - \tau_{z\text{пр}} / \tau_{z\text{пр}}$ (L — размеры дефектов; h — глубина залегания дефектов 1, 4, 7 мм; R — радиус кривизны объекта)

особый подход: и в теории, и в методике и в аппаратуре.

Выводы.

В результате теплофизического моделирования процессов выявления дефектов в ОЦФ установлено следующее: в качественном отношении характер закономерностей ТНК ОЦФ совпадает с известными для объектов плоской формы закономерностями, а именно: величина сигнала от дефекта ΔT существенно зависит от глубины залегания дефекта h (рассматривается схема одностороннего контроля) и в определенной степени — от его поперечного размера L (при $L \leq h$); существуют оптимальные значения параметров режима контроля τ_n , τ_z , при которых сигнал от заданного дефекта (ΔT) максимален; в количественном отношении закономерности ТНК ОЦФ отличаются от аналогичных для объектов прямоугольной формы (типа пластины), причем тем существеннее, чем больше кривизна объекта (до 7 % и более); специфика формы объекта (рассматри-

ваются объекты цилиндрической формы) требует и специфических подходов к построению методики контроля и выбору средств контроля; разработанный для проведения моделирования инструмент (в виде компьютерной программы «Cylinder», реализующей численное решение прямой задачи нестационарной теплопроводности в неоднородных структурах) может быть использован на практике для оценки применимости теплового метода к новым классам объектов, для определения требований к методике и аппаратуре контроля.

1. Стороженко В. А., Вавилов В. П., Волчек А. Д. Неразрушающий контроль качества промышленной продукции активным тепловым методом. — Киев: Техніка, 1988. — 126 с.
2. Лыков А. В. Теория теплопроводности. — М.: Высшая школа, 1967. — 599 с.
3. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. — М.: Наука, 1977. — 345 с.
4. Вавилов В. П. Тепловые методы контроля композиционных структур и изделий радиоэлектроники. — М.: Радио и связь, 1984. — 152 с.