

СТОРОЖЕНКО В.А., д.т.н., проф., ХНУРЭ;
МАЛИК С.Б., асп., ХНУРЭ;
МЯГКИЙ А.В., инж., ХНУРЭ

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ТЕПЛОВОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ НА ОСНОВЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Розроблено нову теплофізичну модель процесу теплової дефектоскопії, яка більш повно відображає цей процес шляхом врахування теплопередачі через дефект та обмеження температури нагрівання матеріалу. На основі аналізу моделі запропоновано методику оптимізації режиму проведення теплової дефектоскопії критерієм максимізації відношення сигнал/шум, яке враховує флуктуації випромінювальної здатності об'єкту контролю і нерівномірність нагріву.

The new thermophysical model of infrared testing process is presented. This model is more adequate and it allows for heat transfer through defect and material reheat temperature limitations. Infrared testing conditions optimization technique based on the analysis of this model is proposed. The SNR maximization criteria is used in this technique and it takes into account testing object emittance fluctuations and heating nonuniformity.

1. Введение и постановка задачи

Тепловая дефектоскопия (ТДС) состоит в определении факта наличия дефекта внутренней структуры объекта контроля (ОК). критерием обнаружения дефекта (трещины, расслоения, воздушного включения и т.п.) является появление на поверхности ОК локальной аномалии – избыточного температурного поля (ΔT), возникающего под действием внешнего теплового потока q .

Для решения задач ТДС рядом исследователей [1, 2, 3] построены теплофизические модели процесса ТДС и реализующие их компьютерные программы, позволяющие рассчитать ожидаемую величину полезного сигнала от дефекта (температурного перепада ΔT), а также определить оптимальный режим проведения контроля: время нагрева τ_n объекта до максимальной температуры $T_{\max}$ и время задержки τ_z , необходимое для формирования максимального температурного перепада ΔT .

Однако существующие теплофизические модели содержат ряд упрощений, снижающих их адекватность (не учитывается или теплопроводность дефекта, или ограничение по температуре нагрева $T_{\max}$ и т.п.). При этом критерием оптимизации является максимум полезного сигнала, в то время как при наличии шумов типа флуктуаций излучательной способности $\Delta \epsilon$ объекта контроля и неравномерности нагрева Δq критерием оптимизации должно быть отношение сигнал/шум.

Целью работы является разработка более совершенной теплофизической модели и оптимизация режима ТДС по критерию максимизации отношения сигнал/шум на основе анализа этой модели.

2. Теплофизическая модель

Для решения поставленной задачи разработана следующая теплофизическая модель (рис. 1).

Объект контроля (ОК) представляется в виде цилиндра с неоднородностью (дефектом). Дефект также имеет цилиндрическую форму и отличается по ТФХ от материала ОК.

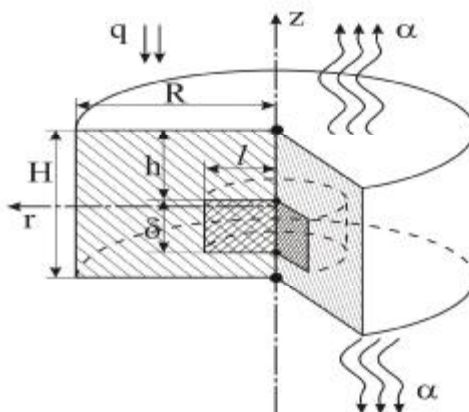


Рис. 1. Объект контроля.

Согласно выбранной модели решение осуществляется при граничных условиях 2- го и 3-го рода на внешних поверхностях ОК:

$$z = H \quad \left(\lambda(\vec{r}, t) \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial n} \right) \Big|_S = \alpha \left(T(\vec{r}, t) \Big|_S - T_{\text{среды}} \right) - q(\vec{r}, t) \quad (1)$$

$$z = 0 \quad -\lambda(\vec{r}, t) \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial n} \Big|_S = -\alpha \left(T(\vec{r}, t) \Big|_S - T_{\text{среды}} \right) \quad (2)$$

где $T(\vec{r}, t)$ - температура объекта контроля; $\lambda(\vec{r}, t)$ - коэффициент теплопроводности (в общем случае может зависеть от температуры), Вт/м·К; $q(\vec{r}, t)$ - плотность потока тепла, Вт/м²; α - коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·К; ρ - плотность вещества, кг/м³.

Соотношения (1, 2) отражают реальные условия проведения ТДС, т.е. нагрев ОК внешним источником тепла и наличие теплообмена с окружающей средой.

Математическая модель процесса ТДС основывается на решении дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности [4], записанного для выбранной цилиндрической системы координат:

$$\text{div}(\lambda(\vec{r}, t) \nabla T(\vec{r}, t)) + q(\vec{r}, t) = c\rho \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t}, \quad (3)$$

где c - удельная теплоемкость, Дж/кг·К.

Для решения уравнения (3) применяется численный (сеточный) метод конечных разностей [4]. Для этого строится пространственно-временная сетка с шагом по времени Δt и координатами соответственно h_1, h_2 (рис. 2). Тогда уравнение (3) аппроксимируется в следующую конечно-разностную схему:

$$\frac{\Delta t}{c\rho} \frac{\lambda}{h^2} T_{i+1}^{t+\Delta t} - \left(1 + 2 \frac{\Delta t}{c\rho} \frac{\lambda}{h^2} \right) T_i^{t+\Delta t} + \frac{\Delta t}{c\rho} \frac{\lambda}{h^2} T_{i-1}^{t+\Delta t} = -T_i^t - \frac{\Delta t}{c\rho} q_i \quad (4)$$

где h - координата линейного размера (h_1, h_2), $T_{i+1}^{t+\Delta t}$ - температура в узле $i+1$ в момент времени $t+\Delta t$, T_i^t - температура в узле $i+1$ в момент времени t .

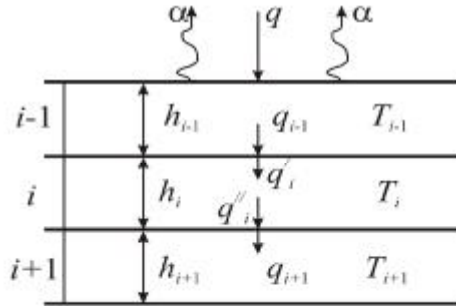


Рис. 2. Схема узловой сетки

При использовании неявной схемы и граничных условий второго и третьего рода (1,2) уравнение (3) приобретает вид:

$$\frac{\Delta t}{c_i \rho_i} \frac{2\lambda_i}{h_i} \frac{\lambda_{i-1}}{\lambda_i h_{i-1} + \lambda_{i-1} h_i} T_{i-1}^{t+\Delta t} - \left(1 + \frac{\Delta t}{c_i \rho_i} \frac{2\lambda_i}{h_i} \left(\frac{\lambda_{i+1}}{\lambda_{i+1} h_i + \lambda_i h_{i+1}} + \frac{\lambda_{i-1}}{\lambda_i h_{i-1} + \lambda_{i-1} h_i} \right) \right) T_i^{t+\Delta t} + \frac{\Delta t}{c_i \rho_i} \frac{2\lambda_i}{h_i} \frac{\lambda_{i+1}}{\lambda_{i+1} h_i + \lambda_i h_{i+1}} T_{i+1}^{t+\Delta t} = -T_i^t - \frac{\Delta t}{c_i \rho_i} q_i, \quad (5)$$

где λ_i - коэффициент теплопроводности в узле сетки i (λ_{i+1} в узле $i+1$, λ_{i-1} в узле $i-1$), c_i - теплоемкость ОК в узле i (c_{i+1} в узле $i+1$, c_{i-1} в узле $i-1$), ρ_i - плотность ОК в узле i (ρ_{i+1} в узле $i+1$, ρ_{i-1} в узле $i-1$), h_i - величина шага по координате h в узле i (h_{i+1} в узле $i+1$, h_{i-1} в узле $i-1$), где шаг может меняться как линейно, так и логарифмически, $T_{i+1}^{t+\Delta t}$ - температура в узле $i+1$ в момент времени $t+\Delta t$, T_i^t - температура в узле $i+1$ в момент времени t .

3. Методика анализа модели

Для проведения расчетов по разработанной пространственно-временной сетке разработана оригинальная программа, названная «TermoPro_2.0s».

В основу программы положен алгоритм, отражающий реальную процедуру тепловой дефектоскопии и состоящий в следующем.

Пользователь задает параметры объекта (ТФХ и линейные размеры), параметры предполагаемого дефекта (a, λ, δ, l, h) и коэффициент теплообмена α . Кроме того, в число исходных данных входит предельно допустимая для данного объекта температура нагрева $T_{\max}$, что крайне важно для предотвращения его разрушения.

Целью расчета является определение величины температурного перепада ΔT на поверхности ОК, вызванного наличием дефекта (рис. 3), а также временные параметры режима контроля, влияющие на величину ΔT . В их числе: время нагрева τ_n объекта до $T_{\max}$ и время формирования (время задержки) τ_z максимального температурного перепада ΔT .

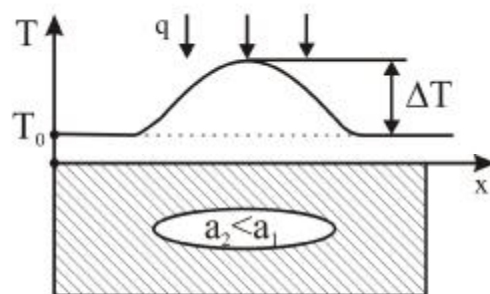


Рис. 3.

Таким образом программа позволяет рассчитать не только полезный сигнал от дефекта, т.е. ΔT , но и определить оптимальный режим проведения контроля по критерию максимизации параметра ΔT .

Кроме того, варьируя значения параметров дефекта (a , λ , δ , l , h), можно проанализировать влияние каждого из них на величину полезного сигнала, а в конечном счете – оценить чувствительность теплового метода в целом.

4. Результаты анализа модели

Для оценки работоспособности модели был выбран конкретный материал – стеклопластик, для которого характерны дефекты в виде воздушных включений: расслоения пустоты и т.п.

Численный материал, использовавшийся при расчетах приведен в таблице:

Параметры	ОК	Дефект
Допустимая температура, $T_{\max}$, °C	100	–
Коэффициент теплоотдачи α , (Вт/(м ² К))	10	–
Коэффициент теплопроводности, λ , (Вт/(м К))	0,3	0,026
Коэффициент температуропроводности, a , (м ² /с)	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$2,16 \cdot 10^{-5}$
Толщина H , мм	0,02	–
Глубина залегания h , мм	–	От 1 до 15
Поперечный размер R (l), мм	0,1	От 2 до 32
Раскрытие δ , мм	–	От 0,25 до 4

Исследовались зависимости величины полезного сигнала (температурного перепада ΔT , вызванного дефектом) от параметров дефекта h , δ и l . Результаты расчетов приведены на рис. 4,5,6.

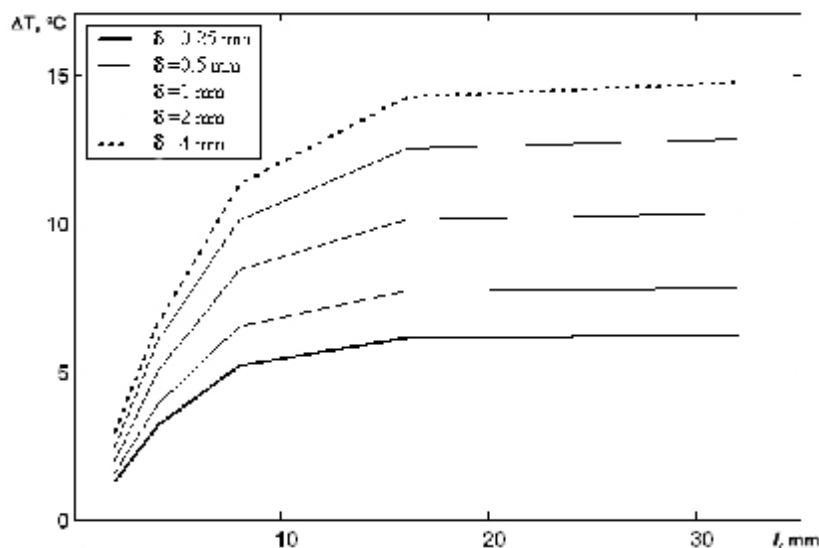


Рис. 4. Зависимость величины температурного перепада над дефектом от поперечного размера дефекта при глубине залегания $h=5$ мм

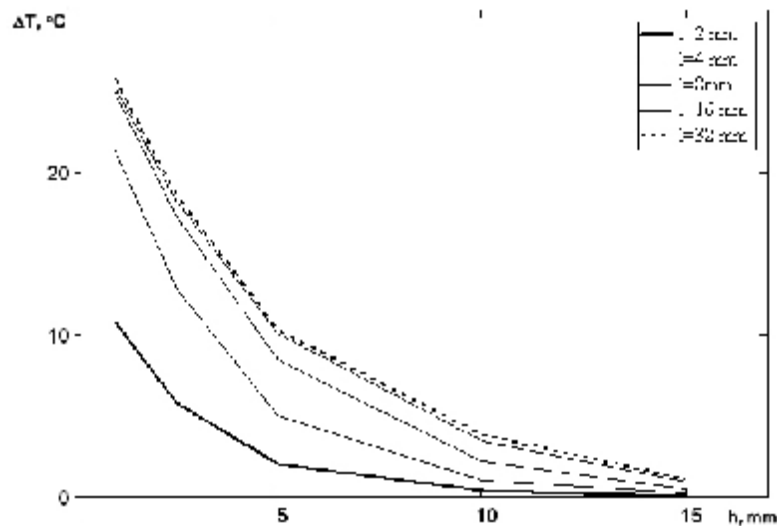


Рис. 5. Зависимость величины температурного перепада над дефектом от глубины залегания дефекта при его раскрытии $\delta=1\text{ мм}$

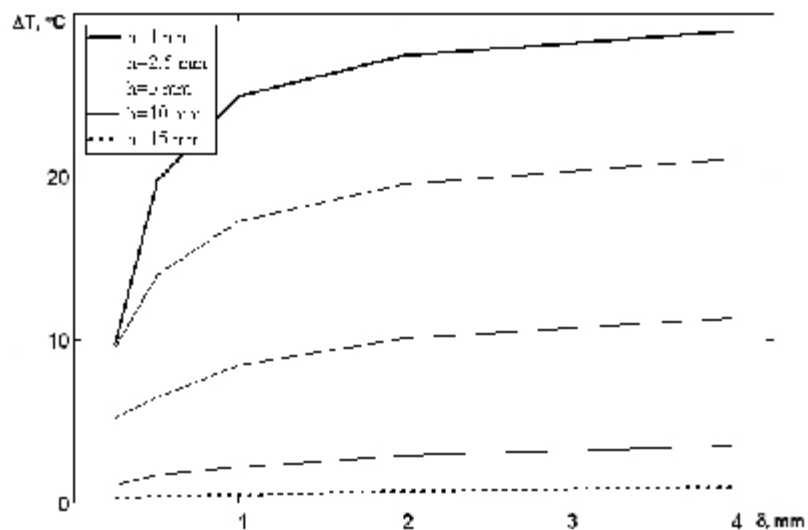


Рис. 6. Зависимость величины температурного перепада над дефектом от величины раскрытия дефекта при радиусе дефекта $l=8\text{ мм}$

Полученные данные свидетельствуют о том, что наибольшее влияние на величину температурного перепада оказывает глубина залегания дефекта, а поперечный размер дефекта и его раскрытие значительно влияют на ΔT только при их малых значениях (до 10 и 1 мм соответственно).

В целом результаты расчетов соответствуют на качественном уровне известным закономерностям ТДС [1,3], что подтверждает работоспособность модели.

Однако, кроме задачи создания адекватной теплофизической модели ОК, основной задачей настоящих исследований является анализ влияния шумов (в частности, неоднородности ϵ) на выявляемость пороговых дефектов.

Для решения этой задачи использовалось эквивалентное изменению ϵ изменение мощности нагрева q . Действительно, если, например, на каком-то участке поверхности объекта контроля ϵ отклоняется в большую сторону, то и нагрев этого участка, т.е. $T_{\max}$, будет больше.

Результаты такого моделирования приведены на рис. 7, где представлено развитие во времени поверхностной температуры для двух случаев: а) бездефектный образец с отклонением по ϵ ; б) образец с дефектом.

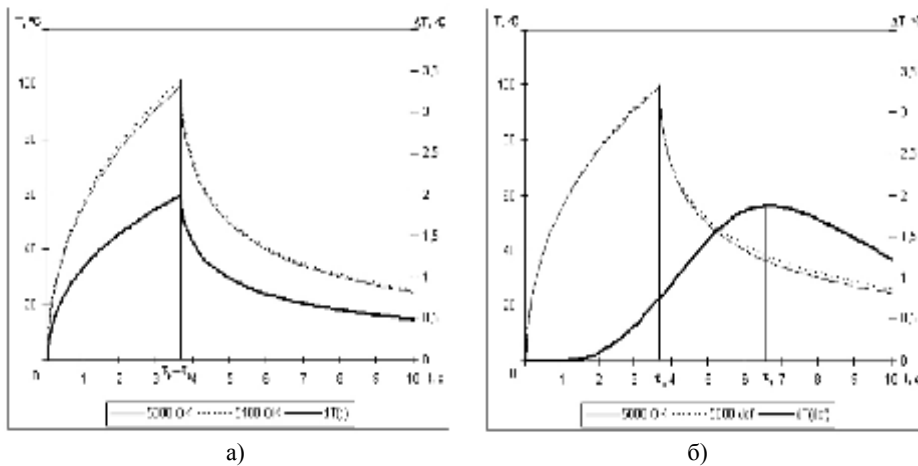


Рис. 7. Развитие во времени поверхностной температуры для:
а) бездефектного образца с отклонением по ϵ ; б) образца с дефектом

Сравнение представленных зависимостей показывает, что моменты времени, соответствующие максимальным значениям помехи ΔT_{ϵ} и полезного сигнала ΔT_{def} не совпадают: сигнал от помехи достигает максимума сразу по окончании нагрева, а полезный сигнал – с определенным временем запаздывания τ_z .

Этот факт открывает возможность максимизировать отношение сигнал/шум (т.е. $\Delta T_{def}/\Delta T_{\epsilon}$) путем выбора соответствующего момента регистрации температурного поля на поверхности объекта контроля.

В частности, согласно данным рис. 7 при выборе времени запаздывания $\tau_z = 3,65$ с отношение сигнал/шум равно 0,4, а при $\tau_z = 6,65$ с это отношение составляет 2,6, т.е. в 6,5 раз больше.

Данный вывод справедлив и для помех другого вида – неравномерного нагрева поверхности ОК, т.е. флуктуации q .

Разработанная модель позволяют не только оптимизировать режим контроля по указанному критерию, но и определять порог чувствительности метода. В частности, зная характерную для данного ОК неравномерность излучательной способности $\Delta \epsilon/\epsilon$, можно определить минимальный поперечный размер r дефекта или его максимальную глубину залегания h по требуемому значению соотношения сигнал/шум.

Выводы

1. Разработана теплофизическая модель ОК, более полно (по сравнению с аналогами) отражающая реальные условия проведения тепловой дефектоскопии и позволяющая оценивать ожидаемую величину сигнала от дефекта с большей достоверностью и анализировать закономерности метода.

2. Предложена методика оптимизации режима проведения тепловой дефектоскопии, основанная на критерии максимизации не самого полезного сигнала, а соотношения сигнал/шум, что позволяет расширить границы применимости метода на ОК, имеющие неравномерность излучательной способности ϵ .

Литература: 1. Стороженко В.А., Маслова В.А. Термография в диагностике и неразрушающем контроле. - Харьков: Компания СМІТ. - 2004. - 160 с. 2. Xavier P. V. Maldague. Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing. - John Wiley & Sons, Inc., 2001, p. 684. 3. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.5: В 2 кн. Кн. 1: Тепловой контроль. /В.П. Вавилов. Кн. 2: Электрический контроль. /К.В. Подмастерьев, Ф.Р. Соснин, С.Ф. Корндорф, Т.И. Ногачева, Е.В. Пахолкин, Л.А. Бондарева, В.Ф. Мужичкий. - М.: Машиностроение, 2004. - 679 с. 4. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики (Издание 7).- М.: МГУ, 2004.- 798 с