

КОНТРОЛЬ І ДІАГНОСТИКА ПРОЦЕСІВ ТА СИСТЕМ В ПРИЛАДОБУДУВАННІ

УДК 620.179

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ТЕПЛОВОЙ ДЕФЕКТОМЕТРИИ

Серый К. Н., Протасов А. Г., Глуценко А. В.

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,
г. Киев, Украина*

В данной статье предлагается подход, основанный на использовании результатов решения прямой задачи теплопроводности и сближении экспериментальных и расчетных данных. В качестве расчетных данных используются результаты компьютерного моделирования процессов теплового контроля. Для моделирования была использована среда программирования FEMLAB. В этой интерактивной среде была создана модель объекта контроля с заданными геометрическими и теплофизическими характеристиками.

Ключевые слова: *компьютерное моделирование, теплопроводность, дефект.*

Введение

Актуальной задачей неразрушающего контроля является не только возможность выявления дефекта в объекте, но и определение его геометрических размеров. Подобная задача относится к типу обратных геометрических задач, которые имеют неоднозначные решения. В задачах тепловой дефектометрии это означает, что одно значение информативного параметра контроля может соответствовать дефектам с различными геометрическими размерами.

Сегодня существует ряд способов решения подобных задач [1]. Однако, недостатком этих способов является сложность интерпретации полученных результатов, что снижает достоверность контроля. В данной статье предлагается подход, основанный на использовании результатов решения прямой задачи теплопроводности и сближении экспериментальных и расчетных данных. В качестве расчетных данных используются результаты компьютерного моделирования процессов теплового контроля. Для моделирования была использована интерактивная среда FEMLAB, которая позволяет формировать модели физических объектов с заданными параметрами и теплофизическими свойствами.

Постановка задачи

Для решения прямой задачи используем двумерную модель теплового неразрушающего контроля [2]. В качестве объекта контроля выбираем металлическую пластину с несколькими дефектами, которые имеют отличные от основного материала объекта теплофизическими характеристиками (рис. 1).

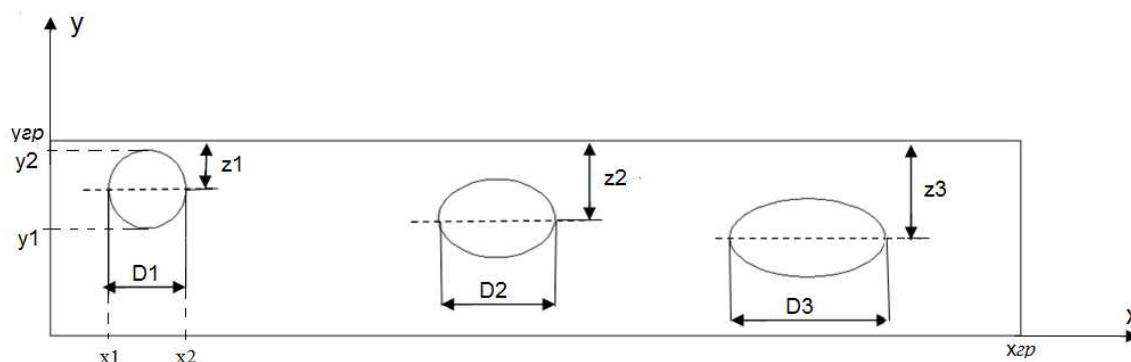


Рис. 1. Схематичний вид объекта контроля с дефектами

Тогда процесс нагрева будет описываться двумерным нестационарным уравнением теплопроводности [2]:

$$c_n \rho_n \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_n \left(\frac{\partial T}{\partial x^2} + \frac{\partial T}{\partial y^2} \right),$$

где T – температура, t – текущее время, x, y – пространственные координаты точек, которые анализируются в n -й области, c_n – теплоемкость среды в n -й области, ρ_n – плотность среды в n -й области, λ_n – теплопроводность среды в n -й области

$$(x, y) \in \sum_{n=1}^2 M_n; c_n, \rho_n, \lambda_n,$$

где x, y – пространственные координаты точек, которые анализируются в n -й области.

Граничные условия для областей M будут иметь вид:

$$\begin{aligned} \lambda_1 \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\substack{x=x_1-0 \\ x=x_2+0}} &= \lambda_2 \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\substack{x=x_1+0 \\ x=x_2-0}}, \\ T \Big|_{\substack{x=x_1-0 \\ x=x_2-0}} &= T \Big|_{\substack{x=x_1+0 \\ x=x_2+0}}, \quad 0 \leq x \leq x_3, \\ \lambda_1 \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{\substack{y=y_1-0 \\ y=y_2+0}} &= \lambda_2 \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{\substack{y=y_1+0 \\ y=y_2-0}}, \\ T \Big|_{\substack{y=y_1-0 \\ y=y_2-0}} &= T \Big|_{\substack{y=y_1+0 \\ y=y_2+0}}, \quad 0 \leq y \leq y_3, t > 0, \end{aligned}$$

на поверхности $y = y_3$ граничные условия определяются в виде:

$$\begin{aligned} \lambda_1 \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=y_3} &= q(t); \\ q(t) &= \begin{cases} Q & \text{при } 0 < t < t_n \\ Q & \text{при } t < 0 \text{ або } t > t_n \end{cases}, \end{aligned}$$

где Q – плотность теплового потока от источника нагрева.

На поверхностях $x = 0$, $x = x_3$, $y = 0$ имеет место теплообмен с окружающей средой по закону Ньютона:

$$\lambda_1 \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = \alpha(T - T_{cp}), \quad 0 \leq x \leq x_3,$$

$$\lambda_1 \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0, x_3} = \alpha(T - T_{cp}), \quad 0 \leq y \leq y_3,$$

где α – коэффициент теплообмена; T_{cp} – температура окружающей среды.

Начальные условия:

$$T \Big|_{t=0} = T_0.$$

Решение задачи

Интерактивная среда FEMLAB может использоваться для моделирования научных и технических задач, которые описываются дифференциальными уравнениями в частных производных. Система FEMLAB позволяет формировать модели физических объектов с заданными параметрами и свойствами, разрабатывать систему уравнений, которая полностью описывает эту модель. FEMLAB имеет несколько взаимосвязанных между собой прикладных режимов, за счет которых создаются возможности построения системы уравнений. При решении системы уравнений в частных производных программная среда использует метод конечных элементов [3].

При помощи среды FEMLAB были проведены исследования влияния дефектов на температурное поле поверхности объекта контроля. В качестве объекта контроля рассматривалась металлическая пластина толщиной 10 мм, с дефектами в виде воздушных раковин диаметром D , равным 4 мм, 6 мм и 8 мм. На рис. 1 схематично показан разрез пластины по толщине. В процессе моделирования изменялась глубина залегания дефектов z в пределах от 2.5мм до 5мм. Эти изменения влияли на распределение температурного поля на поверхности объекта, который предварительно нагревался. Критерием дефектности была выбрана разность температуры между дефектной и бездефектной зонами объекта контроля. В работе исследовалось изменение этой разности температур во времени и определялось оптимальное время контроля, т.е. время, когда упомянутая разность температуры достигает максимума. Значение оптимального времени зависит от ряда параметров, а именно от теплофизических характеристик объекта и геометрических размеров дефектов.

Использование среды MATLAB позволило получить кривые зависимости разности температуры от времени для объекта с дефектами. Для наглядности, на рис. 2 приведены температурные кривые для дефектов, расположение и геометрические размеры которых соответствуют рис. 1.

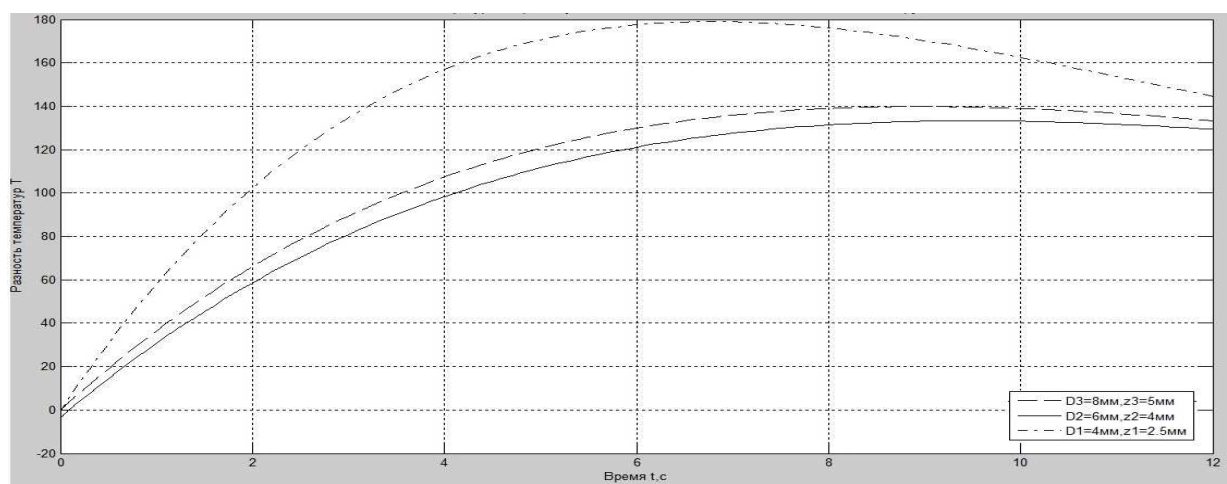


Рис. 2. Временная зависимость разности температур для дефектов с заданными параметрами

Если рассмотреть ситуацию наличия дефектов одинаковых размеров, но имеющих различную глубину залегания (z измениться от 2,5мм до 5мм) (рис. 3), можно проследить закономерное уменьшение разности температуры над дефектом и бездефектным участке, а так же, как видно из таблицы рис. 3, увеличение оптимального времени контроля. Полученные кривые позволяют сделать вывод о наличии дефекта в контролируемом объекте. Однако, для того, чтобы забраковать объект, очень часто необходима дополнительная информация о степени опасности выявленного дефекта, а для этого желательно оценить некоторые его геометрические параметры, например глубину его залегания.

В данной работе внимание уделялось исследованию изменения оптимального времени контроля от глубины залегания дефекта.

В процессе исследования было определено, что с увеличением глубины залегания дефекта оптимальное время его обнаружения возрастает, а максимальная разность температур между дефектным и бездефектным участками объекта уменьшается (рис. 3). Использование формы кривой в качестве информативного параметра для определения геометрии дефекта возможно только для дефектов с небольшой глубиной залегания, где разность температур имеет значительную величину. Как видно из графиков, получить информацию о геометрии дефекта возможно только для поверхностных дефектов.

Установлено, что оптимальное время контроля может быть одинаковым для случая с дефектами разных размеров и расположенных на различной глубине. Особенно это характерно для объектов с высоким коэффициентом теплопроводности. Подобную неоднозначность возможно устранить анализируя форму кривых за одинаковый промежуток времени. Результаты моделирования ситуации совпадения оптимального времени контроля для двух различных дефектов показана на рис. 4. Моделирование выполнялось для дефектов с диаметром $D=6$ мм (верхняя кривая) и $D=8$ мм (нижняя кривая), расположенных на глубине $z = 3.5$ мм и $z = 5$ мм соответственно.

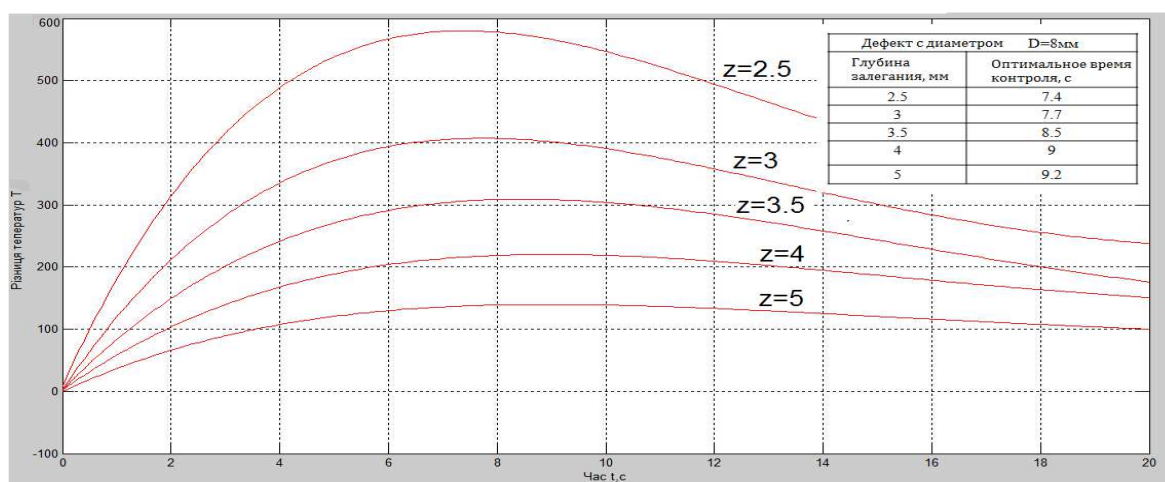


Рис. 3. Временная зависимость разности температур для дефекта $D=8\text{мм}$, расположенного на различной глубине

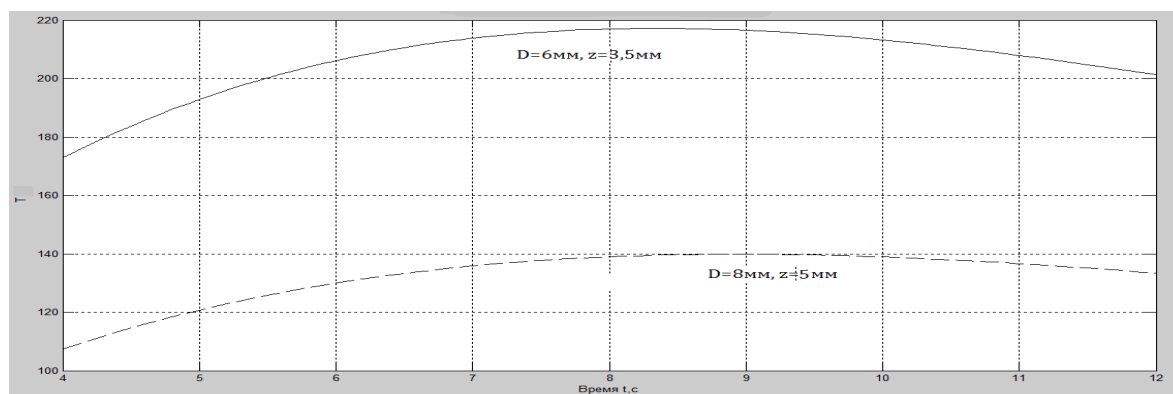


Рис. 4. Кривые разности температур для дефектов различного диаметра и расположенных на разных глубинах

Как видно из рис. 4, оптимальное время контроля для двух дефектов приблизительно одинаковое и можно предположить, что дефект на глубине $z = 5\text{ мм}$ имеет большие геометрические размеры. Однако такой вывод является неоднозначным, поэтому для окончательного вывода необходима качественная оценка параметров. Для этой цели была использована встроенная функция MATLAB - “diff”, которая определяет производную от массива данных.

Производные к указанным кривым позволили определить характер наклона касательных к этим кривым (рис. 5).

Из графика видно, что касательные пересекаются приблизительно в точке оптимального времени контроля. Если исследовать значения кривых после точки пересечения (например, через 5-10 с, после оптимального времени), можно получить информацию о размерах дефектов относительно друг друга. А именно: интенсивность убывания касательной меньше для дефекта, который имеет большие размеры.

Таким образом, полученные графики однозначно подтверждают сделанный ранее вывод, а именно – дефект на глубине $z=5\text{ мм}$ имеет больший размер.

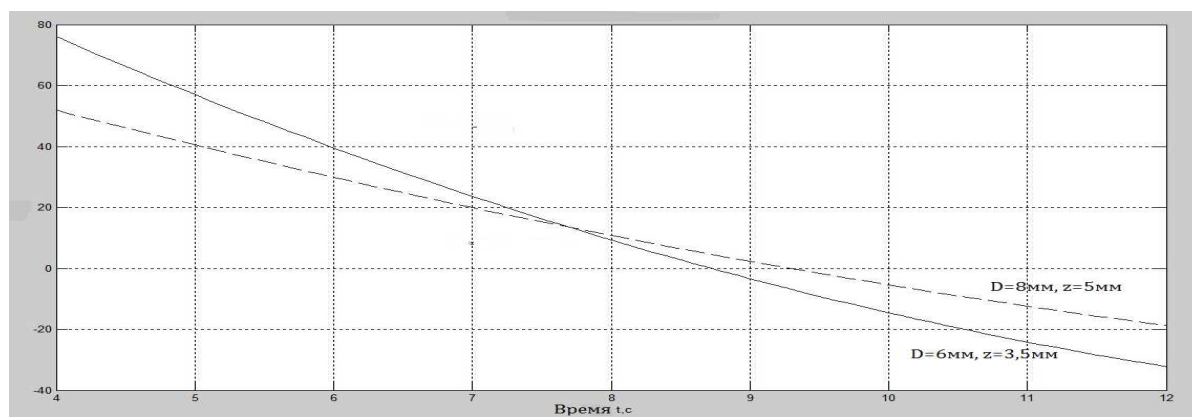


Рис. 5. Производные кривых разности температур

Выводы

Полученные путем моделирования графики зависимости оптимального времени контроля от глубины залегания дефекта и его размера свидетельствуют о том, что с увеличением глубины залегания оптимальное время контроля увеличивается, но при этом максимальная разница температур над дефектным и бездефектными участками объекта контроля уменьшается. Анализируя форму полученных кривых можно судить о геометрических размерах тех дефектов, глубина залегания которых неизвестна.

Неоднозначность, которая возникает при оценке размеров дефекта по разнице температур над дефектным и бездефектными участками объекта контроля может быть устранена путем анализа формы полученных кривых за определенный промежуток времени.

Предложенная методика позволяет с определенной вероятностью оценить размеры внутренних дефектов объекта тепловым методом контроля.

Перспективы дальнейших исследований. На основе полученных зависимостей, возможно, разрабатывать методики определения теплофизических характеристик объекта контроля или инородных включений, которые являются дефектами.

Литература

1. Стороженко В. А. Неруйнівний контроль якості промислової продукції активними тепловими методами / В. А. Стороженко. – К.: Техніка, 1988. – 127 с.
2. Синеглазов В. М. Использование многомерной аппроксимации для определения параметров дефектов тепловыми методами / В. М. Синеглазов, А. Г. Протасов // Дефектоскопия. – 1993. – № 10. – С. 76 – 80.
3. Протасов А. Г. Комп'ютерне моделювання процесів теплового контролю для студентів спеціальності «Неруйнівний контроль та технічна діагностика» / А. Г. Протасов // Інформаційні технології і засоби навчання. – 2009. – № 2 (10). – С. 16.

Надійшла до редакції
22 листопада 2013 року

© Серый К. Н., Протасов А. Г., Глущенко А. В., 2014