

Харківський державний політехнічний університет

На правах рукопису

Мельник Сергій Іванович

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ПРИКЛАДНІ ПИТАННЯ
СТВОРЕННЯ ТЕПЛОВОЇ ДЕФЕКТОМЕТРИЇ ТА ТОМОГРАФІЇ
НА ПІДСТАВІ МЕТОДУ ТЕПЛОВИХ ПЕРЕДАТОЧНИХ ФУНКЦІЙ

05.11.13 - Прилади та методи контролю та захисту навколишнього
середовища, речовин, матеріалів та виробів

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук



Харків - 1996



Дисертація є рукопис

Робота виконана у Харківському державному технічному університеті радіоелектроніки

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Стороженко Володимир Олександрович

Офіційні опоненти - доктор технічних наук, професор
Клейман Олександр Самуїлович

- кандидат технічних наук, доцент
Хоршайло Дрій Євгенович

Провідне підприємство - Інститут проблем енергозбереження
НАН України, м. Київ

Захист відбудеться "26" вересня 1996 р.
на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 02.09.11 у Харківському державному політехнічному університеті (310002, Україна, Харків, МСП, вул. Фрунзе, 21)

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Харківського державного політехнічного університету.

Автореферат розісланий "24" серпня 1996 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Горкунов Б.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Активний тепловий неруйнуючий контроль (ТНК) якості промислової продукції є одним з найбільш ефективних та простих методів визначення наявності внутрішніх дефектів. У його основу закладено взаємодію теплового вимірювання із зразком, що випробується, та реєстрація температурного відгуку на його поверхні.

До переваг методу можна віднести його дистанційність, швидкодію, нешкідливість та ін. Перевагою ТНК є найкраще (у порівнянні з іншими методами) визначення неоднорідностей структури об'єкту, які є аномаліями теплофізичних характеристик (ТФХ). Це робить метод ТНК незамінним, якщо контролюються всілякі теплозахисні конструкції, теплозберігаючі оболонки. Він також є ефективним засобом неруйнуючих випробувань багат шарових та композиційних виробів машинобудування, космічної та авіатехніки та ін.

Але нові технології у промисловості усе частіше потребують від теплового контролю підвищеної інформативності. При цьому виявляється необхідним не тільки зафіксувати з максимальною достовірністю наявність дефекту, а також і визначити з необхідною точністю його геометричні та теплофізичні параметри. Інакше кажучи - вирішити задачу теплової дефектометрії.

До цього часу у більшості випадків для вирішення таких задач використовують метод добирання таких параметрів, які дають найкраще узгодження результатів вимірювання з результатами рішення прямої задачі теплопровідності. Але цей підхід не враховує специфіку процесу теплопередачі, потребує великих ресурсів машинної пам'яті у випадку числового моделювання, що знижує швидкодію та точність методу та у кінцевому рахунку негативно впливає на ефективність процедури теплового контролю. Окрім цього, база даних, що попередньо підготована, не охоплює увесь спектр можливих значень параметрів дефекту та не є універсальною. Альтернативні підходи до вирішення задач теплової дефектометрії, які пов'язані з використанням аналітичних залежностей проміж параметрами дефекту та температурного відгуку, не одержали широкого застосування у зв'язку з занадто вузькою специфікою моделей, для яких ці залежності встановлено.

Треба відзначити, що у деяких випадках дефект у об'єкті, що контролюється, не має чітких меж та постійних значень

теплофізичних параметрів. Такі дефекти є розподіленими і їх контроль виходить за сферу застосування теплової дефектометрії. Це – задача теплової томографії, яка, завдяки дифузному характеру розподілення тепла не може бути вирішена методами, які застосовуються у комп'ютерній томографії для інших типів фізичних полів.

У зв'язку з цим проблема створення нових підходів до здійснення теплової дефектометрії та томографії на підставі методу теплових передаточних функцій, що розглядається у дисертаційній роботі, є актуальною. Її вирішення має значення для подальшого розвитку методу теплового контролю, підвищення його надійності, інформативності та універсальності.

Мета роботи – розробка ефективних методів неруйнуючого контролю широкого класу матеріалів та виробів методом теплової дефектометрії та томографії.

Поставлена мета обумовила такі задачі дослідження:

– розробка математичних методів для вирішення прямих та зворотних задач нестационарної теплопровідності, на яких засновано теплову дефектометрію та томографію;

– створення та аналіз моделей процесів теплової дефектометрії та томографії, які базуються на розроблених методах;

– розробка практичних процедур теплової дефектометрії та їх реалізація;

– створення пакету прикладних програм для проведення процедури дефектометрії конкретних матеріалів та виробів та методики її використання;

– впровадження результатів досліджень.

Методи досліджень. У дисертаційній роботі використано методи математичного моделювання, натурний та обчислювальний експеримент. У свою чергу при побудові математичних моделей було використано кілька методів, серед котрих методи вирішування диференціальних параболічних рівнянь (перетворення Лапласа, Фур'є, метод кінцевих різниць, розкладання в ряд Тейлора), метод еквівалентних витоків тепла, теплових передаточних функцій, нового методу моментів функції теплового відгуку, принцип суперпозиції теплових потоків, методи первинної обробки інформації, новий метод реконструкції теплового відгуку.

Наукова новизна. І. Розроблено новий підхід до вирішення задач теплової дефектометрії (ТДМ) та томографії на підставі методу теплових передаточних функцій. Одержані аналітичні рішення

у випадках одно- та двобічного теплового контролю протяжних дефектів (з визначенням їх теплофізичних характеристик).

2. Створено сукупність математичних моделей об'єктів ТНК та алгоритмів обробки теплового відгуку, яка на підставі більш високої адаптивності до особливостей задачі та врахуванню специфіки процесу розповсюдження тепла дозволяє значно поширити коло прикладання ТДМ та підвищити її точність. Серед них - алгоритм визначення бездефектних областей та граничних умов на поверхні об'єкту контролю; алгоритм реконструкції часових залежностей теплового відгуку по його вимірній частині; алгоритм врахування та компенсації похибок ТНК, які виникають у зв'язку з ефектом розтікання теплового потоку у боки від дефекту.

3. Розроблено новий підхід до вирішення задач ТДМ на підставі розрахунку моментів функції теплового відгуку, одержано аналітичні залежності між цими моментами та параметрами об'єкта контролю та дефекту. На його підставі запропоновано нові критерії дефектності, що дозволяють значно підвищити чутливість ТНК.

4. Розроблено методику вирішування задачі ТДМ у випадках дво-тривимірних моделей. Одержано рішення задачі ТДМ малих дефектів та дефектів типу розшарувань, що забезпечують підвищену інформативність контролю та збільшують стійкість до похибок вимірів.

5. Розроблено алгоритм теплової томографії на підставі - моделі дефекту у вигляді еквівалентного витоку тепла; - інженерної моделі теплопровідності.

6. Розроблено методику контролю якості теплозахисних покриттів на теплоізолюючій основі.

Практична цінність роботи полягає у створенні:

- пакетів програм для вирішування практичних задач теплової дефектоскопії та дефектометрії;
- методики розробки теплофізичної моделі та алгоритму проведення процедури теплової дефектометрії для складних у теплофізичному відношенні об'єктів;
- методики експрес-оцінки розрізнявальної здатності теплової дефектометрії;
- промислових методик ТНК, впроваджених у виробництво.

Реалізація і впровадження результатів роботи.

За участю автора розроблено та впроваджено:
- малогабаритний радіометр ИИ-30А, який було розроблено по договору № 83/24 для НДІТЕМ (м.Москва) при використанні для

контролю об'єктів з теплозахисним керамічним покриттям на металевій основі, дав річний економічний ефект (1988-1989р.р.) 156 тис карб. (особистий внесок дисертанта - 40%);

- новий метод контролю якості теплоізоляції, що було реалізовано шляхом створення контролюючих комплексів у складі теплових дефектоскопів ТД-31А, ТД-10К та системи автоматизації процесу контролю САПК-І, при впровадженні у виробництво виробів з вакуумно-порошковою теплоізоляцією (ХЗТО, м.Харків, договори № 81-22,84/3) дозволив одержати річний економічний ефект 106,4 тис.карб. (особистий внесок дисертанта - 40%)

Апробація роботи. Основні положення і результати виконаних у дисертації досліджень доповідалися та обговорювалися на 4-х міжнародних та 4-х всесоюзних та республіканських конференціях та семінарах.

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 21 друковану роботу. Список основних публікацій приведено далі.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, шести розділів, основних висновків по роботі, списку літературних джерел і додатків. Обсяг роботи складає сторінку основного тексту, малюнків, список літератури вміщує найменувань.

Основний зміст роботи

У вступі дана коротка характеристика дисертаційної роботи: обґрунтована актуальність теми, сформульовані цілі і задачі дослідження, визначені наукова новизна і практична цінність роботи, викладені основні положення, що виносяться на захист, а також наведені відомості про апробацію результатів дослідження та структуру роботи.

У першому розділі наведені результати аналітичного огляду сучасного стану створення теплової дефектометрії та томографії. Розглянуто сутність методу АТНК та його основні види. Показано, що найбільш актуальні проблеми АТНК зараз пов'язані із вирішенням задач дефектометрії та томографії. Проілюстровано той факт, що сучасний розвиток засобів теплового контролю дозволяє розраховувати на одержання достатньо докладної інформації не тільки про наявність та місце знаходження дефекту, але й про теплофізичну структуру об'єкту в цілому. На даному етапі розвитку АТНК для вказаних цілей вже розроблено ряд теплофізичних моделей, котрі, проте, не охоплюють усього спектру

ситуації, що зустрічаються на практиці. До цього ж, більшість існуючих моделей є чисельними, що обмежує їх адаптивність та суттєво знижує швидкість процедур контролю, розроблених на їх основі. Аналітичне ж рішення рівняння теплопровідності у неоднорідному об'єкті з граничними умовами, що прийняті в АТНК, має простий вигляд тільки для одномірної моделі у випадках не теплопровідного або точкового дефекту. І тільки в цьому наближенні воно й може бути використано для вирішення задач теплової дефектометрії. При цьому похибка у визначенні параметрів дефекту тільки за рахунок прийнятих наближень може перевищувати 50%. В інших випадках, як правило, застосовуються чисельні методи рішення прямої задачі, а задача дефектометрії вирішується методом перебору або послідовних ітерацій. До недоліків цих методів можна віднести необхідність доброго початкового наближення, апріорних значень теплофізичних параметрів об'єкту контролю та дефекту, значний час розрахунків кожного варіанту (для дво- трьохвимірних моделей).

Проаналізовано стан одного з найбільш перспективних методів рішення задач теплової дефектометрії та томографії, який пов'язано з інтегральними перетвореннями. Показано, що використання цих методів дозволяє одержати прості аналітичні залежності між інтегральними параметрами функції теплового відгуку, що вимірюється, та параметрами дефекту. Як результат, при розробці процедур дефектометрії можна розраховувати на значне підвищення точності, інформативності та швидкодії. Окрім цього, інтегральний підхід легко може бути узагальнено та використано при розробці універсального алгоритму теплової дефектометрії. Можливість розповсюдження методу на дво- трьохвимірні моделі, а також на неоднорідні граничні умови дозволяє розраховувати на перспективність методу і в задачах теплової томографії. По ряду положень та результатів застосування інтегральних методів у тепловому контролі пріоритет належить автору дисертації.

Другий розділ дисертації присвячено викладенню теоретичних основ застосування методу теплових передаточних функцій (ТКФ) у задачах теплової дефектометрії та томографії. Він складається з 4-х підрозділів.

У першому підрозділі викладено сутність методу. Вона полягає у тому, що всі теплофізичні властивості об'єкту однозначно визначаються його передаточною функцією, яка зв'язує

тепловий вплив Q , який задається (вхід), та температурний відгук T , що вимірюється (вихід). Якщо вхід та вихід задані у фіксованих точках об'єкту, то вони є функціями тільки часу. Виконувачи перетворення Фур'є, ми одержуємо лінійний аналітичний зв'язок проміж образами цих функцій. У двох - трьохвимірній моделі, а також в одновимірній моделі у випадку двостороннього контролю ми маємо кілька входів та виходів. Тому й передаточна функція трансформується у теплову передаточну матрицю (ТПМ) $\tilde{R}(i,k)$ з комплексними коефіцієнтами.

$$\tilde{T}(i) = [R(i,k)] \tilde{Q}(k) \quad (1)$$

При цьому як відомі, так і невідомі параметри теплофізичної моделі увійдуть до коефіцієнтів $R(i,k)$. Для простих об'єктів, таких як однорідний шар, вони можуть бути одержані як аналітичне рішення одновимірного параболічного рівняння з комплексними постійними коефіцієнтами, що виникає у результаті перетворення Фур'є по параметру t (час) вихідного рівняння теплопровідності. Відповідна передаточна матриця має вигляд:

$$\begin{pmatrix} \tilde{T}_{i+1} \\ \tilde{Q}_{i+1} \\ k\lambda_{i+1} \end{pmatrix} = J_i \begin{pmatrix} \tilde{T}_i \\ \tilde{Q}_i \\ k\lambda_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(kd) & -\sin(kd) \\ \sin(kd) & \cos(kd) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{T}_i \\ \tilde{Q}_i \\ k\lambda_i \end{pmatrix} \quad (2)$$

де $k^2 = -i \frac{\omega}{a}$, d - товщина, a - коефіцієнт температуропровідності шару.

Для більш складних об'єктів, котрі, однак, можуть бути представлені у вигляді кола елементів з відомими матрицями, (таких як багатшарові з'єднання, болтові сполучення та ін.), загальна теплова передаточна матриця може бути одержана за допомогою простих правил для послідовних та паралельних сполучень. При паралельному сполученні матриці додаються (це також відноситься і до випадку наявності різних механізмів теплопередачі через один елемент). У випадку послідовного сполучення елементів теплова матриця кожного з них повинна бути перетворена у просторову за формулами:

$$P_{11} = \frac{R_{22}}{R_{12}} ; \quad P_{12} = \frac{\det R}{R_{12}} ; \quad P_{21} = \frac{1}{R_{12}} ; \quad P_{22} = -\frac{R_{11}}{R_{12}} ; \quad (3)$$

Одержана таким чином матриця відповідає за передачу температури T і теплового потоку Q з однієї поверхні на іншу:

$$\begin{vmatrix} \tilde{T}_1 \\ \tilde{q}_1 \end{vmatrix} = P \begin{vmatrix} \tilde{T}_0 \\ \tilde{q}_0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \tilde{T}_0 \\ \tilde{q}_0 \end{vmatrix} \quad (4)$$

Загальна просторова матриця є добутком просторових матриць елементів. Відмітимо, що граничні умови також можуть бути подані у вигляді передаточної матриці і розглянуті по загальній схемі. Для стандартного випадку нагріву поверхні з коефіцієнтом тепловіддачі α та тепловим потоком $q(t)$ просторова матриця граничних умов має вигляд:

$$[a_0] = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ \alpha_0 & k\lambda \end{vmatrix}; \quad [a_1] = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -\alpha_1 & k\lambda \end{vmatrix} \quad (5)$$

Показано, таким чином, що метод ТКФ є універсальним засобом зображення теплофізичних властивостей об'єкту контролю. Множина об'єктів, для яких ТПМ має аналітичний вигляд, значно ширша набору теплофізичних моделей, для яких одержано аналітичне рішення. Намічено перспективу подальшого розвитку методу за рахунок прийняття до розгляду об'єктів з циліндричною та сферичною симетрією.

У другому підрозділі розроблено методику застосування методу ТПМ до вирішування прямих та зворотних задач теплового контролю. В останні можна виділити задачу визначення теплового впливу, що забезпечує заданий температурний режим, та задачу ТДМ. Перша з них може бути вирішена за рахунок звернення теплової передаточної матриці та має до теми дисертації лише побічне відношення. Процедура вирішення задачі ТДМ складається з двох етапів:

- знаходження інтегральних характеристик заданого теплового впливу $Q_k(t)$ та вимірюваних температурних відгуків $T_i(t)$ за допомогою одного з інтегральних перетворень;

- вирішення відносно невідомих параметрів моделі системи алгебраїчних рівнянь, що одержані із співвідношення (1).

Цей метод дозволяє визначати не тільки параметри дефекта якщо відомі параметри бездефектного об'єкта але й параметри самого об'єкта та граничні умови. *

У третьому підрозділі розглянуто перспективну модифікацію методу ТКФ на підставі розробленого автором методу моментів функції теплового відгуку. Сутність методу полягає у побудові

ТІФ та ПІФ, що зв'язують інтегральні моменти функцій теплового впливу та температурного відгуку, а не їх образи. На відміну від перетворень Фур'є та Лапласа, у цьому випадку n -й момент теплового відгуку залежить не тільки від n -го моменту впливу, але й від усіх попередніх моментів. n залежить як від структури об'єкту контролю, так і від кількості визначаємих параметрів. Вони є невідомими у системі рівнянь, що може бути одержана із залежностей типу І-5 для кількох перших моментів.

Таким чином, процедура ТДМ складається з вимірювання необхідної кількості моментів вказаних залежностей та обчислення параметрів дефекту за простими аналітичними формулами. Цей метод має певні переваги у порівнянні з описаними вище. Це:

- значно менша похибка вимірювання моментів теплового відгуку аніж його повного перебігу;

- завдяки цьому зниження вимог до вимірвальної апаратури;

- перехід від комплексних до дійсних коефіцієнтів ТІМ, та від тригонометричних до дрібнораціональних співвідношень, що спрощує вирішення зворотної задачі;

- однозначність алгоритму вирішення задачі ТДМ та його адаптивність до особливостей вимірвальної системи.

Можливе включення набору моментів функції еквівалентного дефекту витоку тепла (див. нижче) безпосередньо у теплофізичну модель об'єкта та перехід до дво- трьохвимірних моделей. Вони описуються узагальненою передаточною матрицею, коефіцієнти котрої, на відміну від одновимірної, зв'язують не тільки часові, але й просторові моменти теплового впливу та відгуку. У порівнянні з (2) маємо:

$$K^2 = -1 \frac{\omega}{a} - \omega_z^2 - \omega_y^2 \quad (6)$$

У четвертому підрозділі обговорюється сталість методу ТІФ. Показано, що некоректна у загальному випадку зворотня задача теплопровідності може бути вирішена за рахунок звуження множини допустимих рішень. При цьому використовуються апріорні положення про однорідність теплофізичних параметрів у обсязі дефекта, про специфіку його форми. Це дозволяє обмежитись 2-4 -ма невідомими параметрами та одержати систему алгебраїчних рівнянь, що має однозначне статне рішення.

Третій розділ дисертації присвячено розробці алгоритмів рішення одновимірних задач ТДМ на підставі застосування методу ТІФ та його модифікацій. Одновимірні моделі застосовуються при дефектометрії протяжних дефектів (розшарувань, щілин), а також

розподілених дефектів. На їх основі, як правило, проектується апаратура теплового контролю.

У відповідності до методики, описаної у другому розділі, побудовані теплова та просторова передаточні матриці для моделі типу багатопарової пластини з граничними умовами третього роду на обох поверхнях. Одержані та вирішені системи алгебраїчних рівнянь для визначення параметрів дефекту у випадках одностороннього та двостороннього контролю. Доведена можливість контролю теплофізичних, а не тільки геометричних параметрів дефекту при двосторонньому повторному нагріванні. Це дозволяє ідентифікувати речовину дефекта. Одержано інтегральний критерій, що дозволяє виявляти ситуацію "дефект під дефектом", що неможливо у інших відомих методиках теплового контролю.

Вирішення задачі ТДМ для одностороннього контролю одержано на підставі як перетворення Фур'є, так і методу моментів. У цьому випадку досягнуто підвищення достовірності результатів контролю.

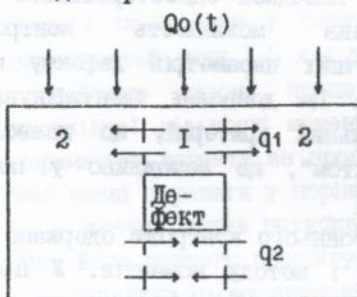
Вирішено ряд допоміжних задач ТДМ, що дозволяють значно підвищити його точність, а у ряді випадків – спростити процедуру контролю та розширити колу його застосування. Зокрема, розроблені алгоритм та програма для ПЕОМ по визначенню теплофізичних характеристик (ТФХ) бездефектного шару як засобу заповнення апіорних даних для проведення ТДМ. У рішенні використано модель однорідного напівпростору та алгоритм односторонньої ТДМ. Характерно, що у якості вихідної інформації використані ті ж самі вимірвальні дані, що й при розгляді шару з дефектом. Це стає можливим за рахунок використання малого значення параметру перетворення (наявність дефекту майже не впливає на коефіцієнти ТДМ у цьому випадку). Похибка визначення ТФХ цим методом не перевищує 3%, що краще, ніж при традиційному використанні табличних даних.

Вирішено задачу поповнення часової залежності теплового відгуку по його вимірюваному інтервалу. Необхідність розгляду цієї задачі пов'язана з тим, що початкова ділянка цієї залежності не може бути виміряна безконтактним методом за рахунок "засвічення" поверхні об'єкту контролю тепловим випромінюванням, а вимірювання "хвоста" залежності потребує значних затрат часу, що суттєво знижує продуктивність контролю. Запропонований підхід дозволяє з точністю 1-5% поновити ці ділянки на підставі вимірювання залежності $T(t)$ тільки в обмеженому інтервалі часу. При цьому використовується принцип суперпозиції та зображення теплового

імпульсу як суми позитивного та негативного витоків тепла, зміщених у часі, а також уявлення про регулярний режим охолодження.

Розроблено методику врахування розтікання тепла на границях дефектних областей, що забезпечує адаптацію виміральної інформації, яку одержано на реальному об'єкті, до одновимірної моделі (мал.1а).

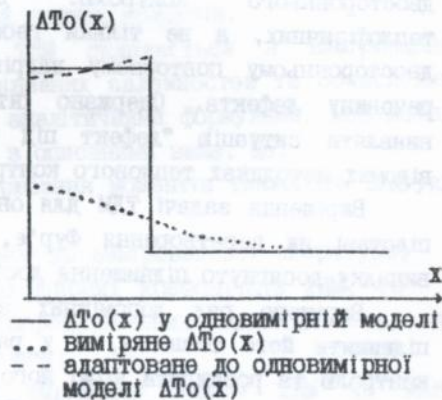
Модель розтікання тепла



Температурний перепад $\Delta T_1(x)$ в області I, що викликано потоком розтікання тепла q_1 , визначається перепадом в області 2, що викликано теж q_1

Мал.1а

Результат застосування алгоритму компенсації розтікання тепла



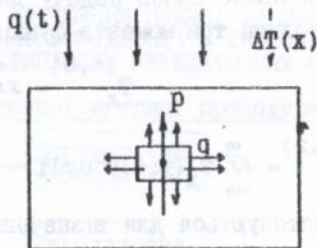
Мал.1б

Сутність методики полягає у компенсації похибки, що виникає за рахунок розтікання тепла у реальному об'єкті (до 50%) шляхом інтегрального врахування усього теплового відгуку на поверхні за формулою:

$$\Delta T(\tau) = \frac{\iint [T(y, z, \tau) - T_{\text{серед}}(\tau)] dz dy}{S} \quad (7)$$

Як результат, вказана похибка знижується до 1-5% (мал.1б).

У четвертому розділі описані рішення задач ТДМ для малих дефектів на підставі застосування методу ТПК та дво-трьохвимірних моделей. Розроблено нову модель об'єкту контролю з дефектом у вигляді еквівалентного витoku тепла (ЕВТ), розподіленого по об'єму дефекту (мал.2). У цій моделі температурний перепад між дефектною та бездефектною областями може бути розглянуто як результат дії цього витoku. У більшості практично важливих випадків ЕВТ можна апроксимувати сукупністю розподіленого у тонкому шарі на глибині h витoku тепла потужність $q(y, z, \tau)$ та теплового диполю $\vec{p}(y, z, \tau)$, котрі однозначно визначаються параметрами дефекта та теплового потоку у бездефектному об'єкті.



МАЛ.2

$$q_h(y, z, \tau) = \frac{\Delta(Cp)\lambda - (Cp)\Delta\lambda}{\lambda} \frac{\partial}{\partial \tau} T(h, y, z, \tau) S(y, z) \quad (8)$$

$$P_h(y, z, \tau) = \Delta\lambda \frac{\lambda_0}{\lambda} \frac{\partial}{\partial x} T(x, y, z, \tau) \Big|_{x=h} S(y, z)$$

Це дозволяє, використовувачи описану вище передаточну функцію бездефектних шарів, розташованих над та під дефектом, зв'язати двовимірні параметри теплового відгуку на поверхні об'єкту з двовимірними параметрами ЕВГ, а потім і з параметрами самого дефекту. При цьому часова залежність відгуку дозволяє визначати глибину залягання дфекту \$h\$. В результаті одержано просту методику рішення прямих та зворотних задач теплового контролю для дефектів типу розшарувань. Розглянуто також і спрощений алгоритм на підставі методу моментів теплового відгуку, котрий дозволяє визначати кілька перших моментів координатної функції розшарування \$R(x, y)\$ (тут \$R\$ - тепловий опір) на підставі виміряних моментів. Чисельний експеримент показав працездатність та ефективність запропонованої методики.

Особливий інтерес являє випадок дефектів, близьких до порогових. Це дефекти малого розміру та великої глибини залягання, сигнал від яких близький до рівня шуму, що до теперішнього часу не дозволяло здійснювати їх дефектометрію. Аналіз загального рішення, проведений методом ТПФ, показав, що еквівалентною моделлю такого дефекту може бути сукупність точкового витoku тепла та теплового диполю, потужності яких пропорційні ефективному об'єму дефекта \$V_{ef}\$ та узагальненому теплофізичному параметру:

$$q_h(\tau) = \frac{\Delta(Cp)\lambda - (Cp)\Delta\lambda}{\lambda} \frac{\partial}{\partial \tau} T(h, y_0, z_0, \tau) V \quad (9)$$

$$P_h(\tau) = \Delta\lambda \frac{\lambda_0}{\lambda} \frac{\partial}{\partial x} T(x, y, z, \tau) \Big|_{x=h} V$$

Для їх визначення (що й являє собою задачу дефектометрії у даному випадку) достатньо обчислити три моменти функції теплового відгуку

$$T_{д}^{(0,0)} = \iint T_{д}(y, \tau) dy d\tau \quad T_{д}^{(1,0)} = \iint T_{д}(y, \tau) \tau dy d\tau \quad (10)$$

$$T_{д}^{(0,2)} = \iint_{-\infty}^{\infty} T_{д}(y, \tau) y^2 dy d\tau$$

Причём перші два використовуються для визначення глибини залягання дефекту, а останній - параметру ефективного об'єму.

Результат вирішення цієї задачі окрім суто практичного застосування має й велике теоретичне значення, тому що вперше дозволяє аналітично розрахувати чутливість процедури теплового контролю.

Дано теоретичний аналіз рішення задач ТДМ з неоднорідними граничними умовами методом ТПФ.

Запропоновано нову методіку теплової дефектометрії об'єктів, що можна уявити як коло одновимірних провідників тепла. При цьому максимально повно використовуються можливості методу теплових передаточних функцій, що дозволяє не тільки вирішувати пряму та зворотню задачу теплового контролю (мал.3), але й оптимізувати параметри процедури (вибір вузлів нагріву та контролю).

У п'ятому розділі викладено два нових підходи до вирішення задачі теплової томографії. У першому з них використано метод послідовних наближень, що застосовується до сукупності моделей дефекту у вигляді еквівалентних витоків тепла (розділ 4). При цьому рішення одновимірної задачі томографії ($\lambda(x)$; $c_p(x)$) шукаємо у вигляді:

$$\lambda = \lambda_0 + \Delta\lambda_1 + \Delta\lambda_2 + \dots + \Delta\lambda_l + \dots \quad (11)$$

$$c_p = (c_p)_0 + \Delta(c_p)_1 + \Delta(c_p)_2 + \dots + \Delta(c_p)_l + \dots$$

Для знаходження $(i+1)$ -ї поправки до параметрів об'єкту $\lambda_0, (c_p)_0$ маємо рівняння:

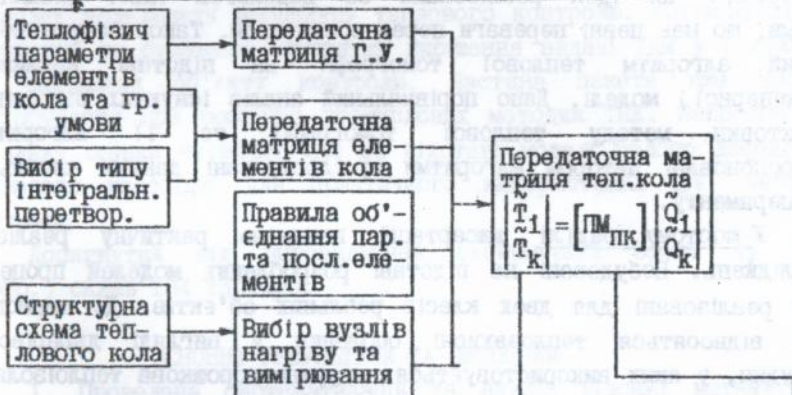
$$\Delta(c_p)_{i+1} \frac{\partial}{\partial t} T_0 - \nabla(\Delta\lambda_{i+1} \nabla T_0) = - \left[\Delta(c_p)_i \frac{\partial}{\partial t} \Delta T - \nabla(\Delta\lambda_i \nabla \Delta T) \right] \quad (12)$$

$$Г.У. \quad \alpha \Delta T = -\Delta\lambda_i \nabla(\Delta T) \hat{n} - \Delta\lambda_{i+1} \nabla T_0 \hat{n}$$

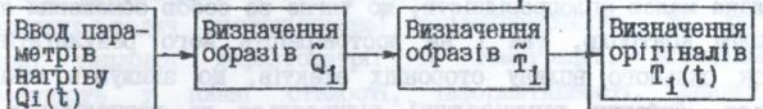
Таким чином, рішення зворотної задачі полягає у методі послідовних наближень та вирішенні зворотної задачі в кожній ітерації відносно $\lambda_{i+1}, \Delta c_{p,i+1}$. Ця задача значно простіша, ніж вихідна, тому що шукані параметри присутні тільки у вільному члені лінійного диференційного рівняння, що не містить $\Delta T(r, t)$.

АЛГОРИТМ ВИРІШЕННЯ ПРЯМОЇ ТА ЗВОРОТНОЇ
ЗАДАЧ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ У ТЕПЛОВИХ КОЛАХ
МЕТОДОМ ТЕПЛОВИХ ПЕРЕДАТОЧНИХ ФУНКЦІЙ

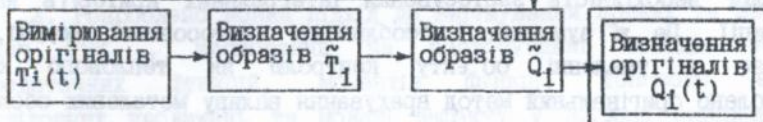
Побудова передаточної матриці процедури контролю



Вирішування прямої задачі



Вирішування зворотної задачі I



Вирішування зворотної задачі 2

(задачі дефектометрії)



Мал.3

Побудовано також аналогічну процедуру рішення прямої задачі.

Інший підхід засновано на безпосередньому обертанні алгоритму чисельного рішення прямої задачі. Першою спробою у цьому напрямку є робота авторів Вавилова В.П., Іванова А.Н., Малдага К. В дисертації ця ідея реалізована за допомогою іншої різницевої схеми, що має певні переваги перед прототипом. Також запропоновано новий алгоритм теплової томографії на підставі наближеної (інженерної) моделі. Дано порівняльний аналіз існуючих підходів до трактовки методу теплової томографії та її алгоритмів. Запропоновані автором алгоритми проілюстровані даними чисельного експерименту.

У шостому розділі дисертації викладно практичну реалізацію досліджень. Побудовані на підставі розроблених моделей процедури ТНК реалізовані для двох класів реальних об'єктів. До першого з них відносяться теплозахисні оболонки у вигляді дьмарівських посудин, у яких використовується вакуумно-порошкова теплоізоляція. Проблема контролю якості теплоізоляції (знаходження її аномалій) зумовлена малов еплопровідністю, що тягне за собою обмеження як на швидкість контролю, так і на достовірність його результатів за рахунок сильного впливу сторонніх ефектів, що знижують точність контролю. Дефекти теплоізоляції відносяться до розподілених, що зумовлює необхідність застосування інтегральних критеріїв якості продукції. Це ж зумовлює і особливості застосованої моделі, що полягає в уявленні об'єкту контролю як теплового кола. Розроблено оригінальний метод врахування впливу металевих оболонок як додаткового члену у граничних умовах. У сукупності це дозволило:

- скоротити на два порядки тривалість контролю;
- дати кількісну оцінку величини дефекту;
- вирішити задачу розрізнення дефектів різних типів: аномалії структури наповнювача, погіршення вакуума та порушення герметичності у крищі.

Другий об'єкт - вогнетривке теплозахисне покриття на товстій металевій підкладці. Застосування інтегрального методу до задачі дефектометрії цього об'єкту дозволило розробити методику визначення теплового опору покриття та оптимізувати цю процедуру по параметрам потужності та часу нагріву.

Проілюстрована також можливість застосування запропонованих моделей та алгоритмів для вирішення інших технічних задач, пов'язаних з рішенням прямої та зворотної задачі розповсюдження

фізичних полів у багат шаровому об'єкті з неоднорідностями (на прикладі задачі керування процедурами ВЧ-гіпертермії, що широко застосовується у фізіотерапії).

Наприкінці розділу описано пакет прикладних програм, що дозволяє моделювати процедуру теплового контролю, оптимізувати її параметри та будувати алгоритми вирішення задачі ТДМ у залежності від специфіки об'єкту контролю. Частина пакета вже знайшла застосування при розробці промислових методик ТНК. Запропоновано методичку оцінки чутності ТДМ на підставі моделі малого дефекту та приведено необхідні для практичного використання цієї методички діаграми.

Досягнутий від впровадження економічний ефект (у цінах 1990р.) склав 104 тис.крб.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. Проведена систематизація та аналіз відомих математичних моделей та методів, що використовуються для вирішення прямих та зворотних задач нестационарної теплопровідності, що лягають в основу теплової дефектометрії та томографії. Встановлено їх обмеженість у плані сталості, інформативності, швидкодії та точності.

2. Розроблено новий підхід до вирішування прямих та зворотних задач ТНК, заснований на застосуванні методів теплових передаточних функцій, моментів функції теплового відгуку, послідовних наближень та моделі дефекту у вигляді еквівалентного витоку тепла.

3. Побудовано модель теплової дефектометрії в одновимірному наближенні та вирішено ряд задач, що підвищують універсальність та інформаційність теплового контролю;

- одержання аналітичного зв'язку параметрів дефекту з фур'є-гармоніками вимірюваного теплового відгуку;

- відновлення повної часової залежності теплового відгуку по його вимірній частині та апріорній інформації про характер теплового впливу;

- поповнення апріорних даних про параметри бездефектного об'єкту контролю без проведення додаткових вимірювань;

- побудова моделі врахування розтікання тепла на границях дефектної області.

4. Побудовано двовимірну модель теплової дефектометрії та на її підставі вирішено задачі теплового контролю розшарувань, малих

дефектів. Запропонована методика рішення задач теплової дефектометрії у випадку неоднорідних граничних умов та модель об'єкта теплового контролю у вигляді кола "теплових провідників".

5. Розроблено два нових алгоритми одновимірної теплової томографії, що мають більшу універсальність та точність у порівнянні з відомими.

6. Вирішено ряд практичних задач на підставі розроблених автором методів моделювання теплових процесів:

- розроблено алгоритм контролю дьварівських посудин з вакуумно-порошковою теплоізоляцією,
- розроблено нову методику контролю теплозахисних покриттів,
- Розроблено пакет прикладних програм теплової дефектометрії.

Основні положення дисертації відображено у таких роботах:

1. Стороженко В.А., Іванишина З.В., Мельник С.И. Упрощений метод аналізу задач активного теплового невідрушаючого контролю // Дефектоскопія, 1987, N 2, с. 81-85.

2. Стороженко В.А., Мельник С.И. Метод передаточних функцій в теплової дефектометрії // Дефектоскопія, 1991, N 12, с. 78-83.

3. Неразрушаючий контроль якості вакуумно-порошкової теплоізоляції активним тепловим методом /Стороженко В.А., Іванишина З.В., Мельник С.И., Марченко С.Ф., Харків. ін-т радіоелектроніки.-Харків, 1986.- 29с.- Бібліогр.5 назв.-Рус.-Депон. в УкрНИИТИ. 26.11.86, N1287-Ук 86

4. Тепловая дефектометрия малых дефектов на основе метода тепловых передаточных функций / Мельник С.И., Стороженко В.А.; Харків. ін-т радіоелектроніки.-Харків, 1993. -8 с.-Бібліогр.: 6 назв. - Рус.- Деп. в ГНТБ України 14.10.93, N1966-Ук 93

5. Метод понижения размерности в задачах тепловой дефектометрии./Мельник С.И., Харьковский ин-т радиоэлектроники.- Харків, 1993.-19 стр.- Рус.- Деп. в ГНТБ України 12.03.93, N 81-Ук.93.

6. Применение метода моментов для решения задач тепловой дефектометрии ./Мельник С.И., Харьковский ин-т радиоэлектроники.- Харків, 1993.-12 стр.- Рус.- Деп. в ГНТБ України 26.08.93, N 1790 -Ук 93.

7. Алгоритм тепловой томографии объектов, не содержащих внутренних источников тепла./Мельник С.И., Харьковский ин-т радиоэлектроники.- Харків, 1993.-12 стр.- Рус.- Деп. в ГНТБ України

27.10.93, N 2090 - Ук 93.

8. Стороженко В.А., Мельник С.И. Контроль качества теплозащитных пленочных покрытий активным тепловым методом // Оптические, радиоволновые и тепловые методы и средства неразрушающего контроля качества изделий. - Могилев. 1989. ч. 2, с. 174-175.

9. Melnik S.I., Storozhenko V.A. Thermal Defectometry of small Defects on Transfer Function Method Base // Abstracts of the 8-th International Conference THERMO-93, Hungary, Budapest, 1993.

10. Storozhenko V.A., Melnik S.I. Thermal characterization and tomography of solids using new theoretical approaches // Abstracts of the Euroterm seminar N42 "QIRT'94", Sorrento, Italy, 1994

II. В.А.Стороженко, С.И.Мельник. Развитие тепловой дефектометрии и томографии на основе новых теоретических подходов. // Техническая диагностика и неразрушающий контроль в Украине.- Днепропетровск.1994. с. 27-29.

Особистий внесок автора у роботах, що виконано у співавторстві, полягає у створенні теплофізичної моделі виробів з вакуумно-порошковою теплоізоляцією та розробці методики їх дефектометрії [1,3]; впровадженні методу передаточних функцій у тепловому контролі та створенні необхідного математичного апарату [2]; розробці нових теплофізичних моделей для дефектів типу розшарувань, дефектів, відгук від яких близький до порогового, складних у теплофізичному відношенні об'єктів, та створенні нових методик теплової дефектометрії на їх підставі [4,9]; розробці ряду допоміжних алгоритмів теплової дефектометрії, що призводять до значного підвищення її чутності та розширяють коло її прикладання [10,11]; розробці нової моделі теплозахисних покриттів та її прикладання у новому алгоритмі теплової дефектометрії цих виробів [8]. Роботи [5,6,7] автором дисертації виконано самостійно.

112.0025

ABSTRACT

Melnik S.I. Theoretical and applied questions of creation of thermal defectometry and tomography on the base of the thermal transfer function method.

The dissertation for a seeking of the scientific degree of candidate's of technical sciences on speciality 05.11.13 - devices and methods of the control and protection of the environment, substances and items. Kharkov state politechnical university, Kharkov 1996.

Number of effective methods of the non-destructive testing for wide class of materials and products are worked out with the thermal defectometry and tomography methods in the dissertation. These are based on the analytical correlations between the integral thermal reverberation parameters and the parameters of the thermophysical model of the having defect object of control.

АННОТАЦИЯ

Мельник С.И. Теоретические и прикладные вопросы создания тепловой дефектометрии и томографии на основе метода тепловых передаточных функций.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 - приборы и методы контроля и защиты окружающей среды, веществ, материалов и изделий. Харьковский государственный политехнический университет. Харьков. 1996.

В диссертации разработан ряд эффективных методов неразрушающего контроля широкого класса материалов и изделий методом тепловой дефектометрии и тепловой томографии. В их основе лежат аналитические соотношения между интегральными параметрами теплового отклика и параметрами теплофизической модели объекта контроля с дефектом.

Ключові слова : тепловий контроль, інтегральні перетворення, зворотна задача теплопровідності, тепла томографія, еквівалентні витоки тепла, теплофізичні параметри.

Подписано к печати 12.07.96 Объем 1п.л. Заказ № 124 тираж 100 экз. Бесплатно.

Отпечатано на аппарате RIZO НПП "ИНФОТЕХ-СЕРВИС ЛТД" Украина, 310002 г.Харьков, ул.Мироносицкая,25.