

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

Кафедра Проектування та експлуатації електронних апаратів
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

ГЮК.404233.010 ПЗ

(позначення документа)

Дослідження математичних методів для вирішення прямих
та зворотних завдань нестационарної теплопровідності

(тема)

Виконав

студент 2-го курсу, групи РЕАЗм-21-1
Грищенко О.Ю.

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 172 – «Телекомунікації
та радіотехніка»

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Радіоелектронні
апарати та засоби

(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Сучков Г.М.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

Хорошайло Ю.Є.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

2022 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
Кафедра Проектування та експлуатації електронних апаратів
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 172 – «Телекомунікації та радіотехніка»
(код і повна назва)
Тип програми Освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)
Освітня програма Радіоелектронні апарати та засоби
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри ПЕЕА _____
(підпис)
« ___ » _____ 20 _____ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Грищенку Олександрю Юрійовичу
(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема роботи Дослідження математичних методів для вирішення прямих та зворотних завдань нестационарної теплопровідності

Затверджена наказом університету 14 11 2022 № 1475Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 01 12 2022 р.

3. Вихідні дані до роботи Дослідити теплофізичні методи контролю геометричних розмірів та контролю дефектів діелектричних матеріалів

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі 4.1 Перелік умовних познач, скорочень; 4.2 Вступ; 4.3 Аналітичний огляд сучасного стану теплової дефектометрії та томографії; 4.3.1 Сутність завдань теплової дефектометрії та томографії та їх

класифікація; 4.3.2 Аналіз математичних моделей та методів, що використовуються для вирішення задач теплової дефектометрії та томографії; 4.3.3 Результати огляду;

4.4 Теплова дефектометрія виробів з дефектами малих розмірів; 4.4.1 Постановка задачі;

4.4.2 Модель дефекту у вигляді еквівалентного розподіленого джерела тепла;

4.4.3 Застосування методу теплових передавальних функцій у двовимірних та тривимірних задачах теплової дефектометрії; 4.4.4 Розв'язання задачі теплової

дефектометрії розшарування зі змінним розкриттям; 4.4.5 Теплова дефектометрія навколопорогових дефектів; 4.4.6 Особливості вирішення дво- та тривимірних завдань

теплової дефектометрії у разі неоднорідних граничних умов; 4.4.7 Теплова дефектометрія на основі представлення об'єкта контролю ланцюгом теплових провідників; 4.4.8 Оцінка

чутливості теплової дефектометрії на основі методу ТПФ; 4.5 Охорона праці;

4.6 Висновки; 4.7 Перелік джерел посилань.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) Слайди презентації, що наведені в додатках.

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по-батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз завдання	06.09.2022	
2.	Пошук літератури	15.09.2022	
3.	Аналітичний огляд сучасного стану теплової дефектометрії	01.20.2022	
4.	Теплова дефектометрія виробів з дефектами малих розмірів	14.10.2022	
5.	Розв'язання задачі теплової дефектометрії розшарування зі змінним розкриттям	20.10.2022	
6.	Оцінка чутливості теплової дефектометрії на основі методу ТПФ	05.11.2022	
7.	Виконання розділу «Охорона праці»	10.11.2022	
8.	Оформлення пояснювальної записки	20.11.2022	

Дата видачі завдання 01 вересня 2022 р.

Здобувач

(підпис)

Грищенко О.Ю.

(прізвище, ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

проф. Сучков Г.М.

(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 61 с., 7 рис., 2 табл., 18 джерел, 1 додаток.

КОНТРОЛЬ, ДОСЛІДЖЕННЯ, МОДЕЛЬ, ДЕФЕКТОМЕТРІЯ, ДЕФЕКТОСКОПІЯ, ТОМОГРАФІЯ

Метою роботи є розробка ефективних методів неруйнівного контролю широкого класу матеріалів та виробів методом теплової дефектометрії та теплової томографії.

Для досягнення вказаної мети у магістерській роботі розглянуто вирішення наступних завдань наукового характеру:

- дослідження математичних методів для вирішення прямих та зворотніх завдань нестационарної теплопровідності, що лежать в основі теплової дефектометрії та томографії;

- аналіз моделей процесів теплової дефектометрії та томографії, що базуються на розроблених методах:

- дослідження практичних процедур теплової дефектометрії та їх оптимізація.

Кваліфікаційну роботу оформлено згідно ДСТУ-3008-15 [1].

ABSTRACT

Explanatory note: 61 p., 7 fig., 2 table, 18 sources, 1 application.

CONTROL, RESEARCH, MODEL, DEFECTOMETRY, DEFECTOSCOPY, TOMOGRAPHY

The goal of the work is the development of effective methods of non-destructive testing of a wide range of materials and products by the method of thermal defectometry and thermal tomography.

To achieve this goal, the master's thesis considered the solution of the following scientific problems:

- research of mathematical methods for solving direct and inverse problems of non-stationary thermal conductivity, which are the basis of thermal defectometry and tomography;

- analysis of thermal defectometry and tomography process models based on the developed methods:

- research of practical procedures of thermal defectometry and their optimization.

The qualification work was designed according to DSTU-3008-15 [1].

ЗМІСТ

Перелік умовних познач, скорочень.....	7
Вступ.....	9
1 Аналітичний огляд сучасного стану теплової дефектометрії та томографії .	12
1.1 Сутність завдань теплової дефектометрії та томографії, їх класифікація.....	12
1.2 Аналіз математичних моделей та методів, що використовуються для вирішення задач теплової дефектометрії та томографії	16
1.3 Результати огляду	21
2 Теплова дефектометрія виробів з дефектами малих розмірів.....	23
2.1 Постановка задачі.....	23
2.2 Модель дефекту у вигляді еквівалентного розподіленого джерела тепла.....	23
2.3 Застосування методу теплових передавальних функцій у двовимірних та тривимірних задачах теплової дефектометрії.....	26
2.4 Розв'язання задачі теплової дефектометрії розшарування зі змінним розкриттям	27
2.5 Теплова дефектометрія навколопорогових дефектів	29
2.6 Особливості вирішення дво- та тривимірних завдань теплової дефектометрії у разі неоднорідних граничних умов	33
2.7 Теплова дефектометрія на основі представлення об'єкта контролю ланцюгом теплових провідників.....	35
2.8 Оцінка чутливості теплової дефектометрії на основі методу ТПФ...	38
3 Охорона праці	41
3.1 Аналіз умов праці.....	41
3.2 Забезпечення виробничої санітарії за умов виробництва.....	42
3.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях у приміщенні наукової лабораторії	45
Висновки	47
Перелік джерел посилань	48
Додаток А – Презентація	50

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАК, СКОРОЧЕНЬ

- A – відносний температурний контраст
 a, a_d – температуропровідність матеріалів об'єкта та дефекту, відповідно ($\text{м} / \text{с}^2$);
 BI – критерій Біо;
 C – питома теплоємність [$\text{Дж} / \text{кг К}$];
 P – критерій Фур'є;
 H – поперечний розмір дефекту [мм];
 h – глибина залягання дефекту [мм];
 L – поперечний розмір об'єкта [мм];
 l – товщина стінки об'єкта [мм];
 Δl – лінійний дозвіл (миттєве поле зору) радіометра [мм];
 q – щільність потоку потужності [$\text{Вт} / \text{м}^2$];
 P – координатна теплова передатна функція об'єкта;
 R – тепловий опір [$\text{м К} / \text{Вт}$];
 R^* – теплова передатна функція об'єкта ;
 S – площа плями нагріву [м^2];
 T – температура [$^{\circ}\text{C}$];
 T_{\max} – гранично допустима температура нагрівання поверхні об'єкта [$^{\circ}\text{C}$];
 ΔT – абсолютний температурний контраст [$^{\circ}\text{C}$];
 T_p – температурна роздільна здатність радіометра [$^{\circ}\text{C}$];
 $\Delta T_{\text{ш}}$ – температурний контраст, еквівалентний сигналу перешкоди r [$^{\circ}\text{C}$];
 α – коефіцієнт тепловіддачі [$\text{Вт} / \text{К м}^2$];
 λ, λ_d – теплопровідність матеріалів об'єкта та дефекту відповідно [$\text{Вт} / \text{м К}$];
 ε – випромінювальна здатність поверхні об'єкта;
 ρ – щільність [$\text{кг} / \text{м}^3$];
 τ_H – час нагрівання об'єкта до T_{\max} [с];
 τ_p – час від початку нагрівання до моменту реєстрації температури [с];
 τ_3 – час запізнення;

δ – розкриття дефекту [мм³];

АТНК – активний тепловий неруйнівний контроль;

ГУ – граничні умови;

ДТЗ – джерело теплового збудження;

ІЧ – інфрачервоний;

НК – неруйнівний контроль;

ЗЗ – зворотне завдання;

ОК – об'єкт контролю;

ТДМ – теплова дефектометрія;

ТДС – теплова дефектоскопія;

ТНК – тепловий неруйнівний контроль;

ТПФ – теплова передатна функція;

ТТ –;

ТФХ – теплофізичні характеристики;

ЕДТ – еквівалентне джерело тепла.

ВСТУП

Актуальність роботи.

Активний тепловий неруйнуючий контроль (АТНК) якості промислової продукції є одним з відомих і динамічно розвиваючихся методів визначення наявності внутрішніх дефектів. В його основі лежить взаємозв'язок між температурним відгуком на поверхні об'єкта контролю у відповідь на зовнішній тепловий вплив та внутрішньою структурою об'єкту. В числі загальноприйнятих досягнень методу – його дистанційність, швидкодія, нешкідливість і надалі. Перевагою теплового неруйнівного контролю (ТНК) – виявлення неоднорідностей структури об'єкта, що являють собою аномалії теплофізичних характеристик (ТФХ) [2]. Це робить метод АТНК незамінним при контролі всіляких теплозахисних конструкцій, теплозберігаючих оболонок, ефективним засобом при неруйнівних випробуваннях багат шарових та композиційних виробів машинобудування, космічної та авіатехніки тощо.

Нові технології в промисловості потребують від теплового контролю підвищеної інформативності. При цьому необхідно не тільки зафіксувати з максимальною достовірністю наявність дефекту, але також і визначити з необхідною точністю його геометричні та теплофізичні параметри, тобто – вирішити завдання теплової дефектометрії (ТДМ).

Досі в більшості випадків для вирішення таких завдань використовується метод перебору, що полягає в багаторазовому вирішенні прямої задачі теплопровідності з параметрами дефекту, що варіюються, до досягнення прийняттого узгодження результатів розрахунків з даними теплової дефектоскопії виробу.

Подібний підхід не враховує специфіки процесу теплопередачі, потребує великих ресурсів машинної пам'яті при його чисельному моделюванні, що знижує швидкодію та точність методу і в кінцевому підсумку відбивається на ефективності процедури ТДМ.

Крім того, база даних, що попередньо заготовляється, не може охопити всього спектра можливих значень параметрів дефекту і не є універсальною.

Альтернативні підходи до вирішення задач теплової дефектометрії, пов'язані з використанням аналітичних залежностей між параметрами дефекту та температурного відгуку, також не отримали широкого застосування, що пов'язано з вузької специфічністю моделей, для яких встановлені такі залежності.

У ряді випадків дефект у контрольованому об'єкті не має чітко виражених меж та постійних теплофізичних параметрів. Такі дефекти називають розподіленими та їх контроль виходить за рамки застосування методу теплової дефектометрії. Це – завдання теплової томографії (ТТ), яка з дифузійного характеру розтікання тепла може бути вирішена методами, застосовуваними в комп'ютерній томографії інших типів фізичних полів.

Разом з тим досягнуті до теперішнього часу успіхи у розвитку ТДМ та ТТ переконливо свідчать про їхню перспективність та необхідність для потреб сучасного виробництва.

Ціллю роботи є дослідження ефективних методів неруйнівного контролю широкого класу матеріалів та виробів методом теплової дефектометрії та теплової томографії.

Для досягнення вказаної мети у роботі розглянуто рішення наступних завдань:

- дослідження математичних методів для вирішення прямих та зворотних завдань нестационарної теплопровідності, що лежать в основі теплової дефектометрії та томографії;

- аналіз моделей процесів теплової дефектометрії та томографії, що базуються на розроблених методах;

- дослідження практичних процедур теплової дефектометрії та їх оптимізація;

- побудова діаграм оцінки чутливості.

Предмет та методи досліджень. В кваліфікаційній роботі використані методи математичного моделювання, натурний та розраховуємий експеримент.

При побудові математичних моделей використовувалися кілька методів, серед яких методи розв'язання диференціальних параболічних рівнянь (перетворення Лапласа, перетворення Фур'є, метод кінцевих різниць, розкладання в ряд Тейлора), методи еквівалентних джерел тепла, теплових та просторових передавальних функцій, моментів функції теплового відгуку, принцип суперпозиції, методи первинної обробки вимірювальної інформації, методу реконструкції теплового відгуку.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕПЛОВОЇ ДЕФЕКТОМЕТРІЇ ТА ТОМОГРАФІЇ

1.1 Сутність завдань теплової дефектометрії та томографії, їх класифікація

За формальними ознаками сутність теплової дефектометрії (ТДМ) відрізняється від теплової дефектоскопії (ТДС) тільки в одному аспекті – отриманні чисельних значень параметрів дефектів, що виявляються, проте ця відмінність тягне за собою появу ряду принципових особливостей. Так, ефективне проведення ТДМ неможливе без глибокого аналізу теплових процесів, що протікають в об'єкті контролю (ОК), оптимізації на цій основі режимів контролю та створення адекватних типу дефекту та можливостей засобів контролю оптимальних математичних моделей.

Фізична сутність методу ТДМ ґрунтується на фундаментальних положеннях теплофізики, теорії обробки та передачі інформації, метрології. Тому для розвитку АТНК і ширшого використання на практиці необхідний комплексний підхід, заснований на досягненнях усіх цих областей науки.

Схему проведення ТДМ можна спрощено уявити так, як наведено на рисунку 1.1.

Під впливом зовнішнього джерела теплового впливу (МТБ) порушується термодинамічна рівновага об'єкта контролю з навколишнім середовищем, в результаті чого на поверхні виникає надлишкове температурне поле, характер якого дозволяє отримати інформацію про властивості об'єкта, що цікавлять [3]. Реєстрацію температурного поля проводять спеціальним реєструючим пристроєм (РУ), яке крім термочутливих елементів включає систему попередньої обробки інформації, а також інші допоміжні вузли. Оброблений сигнал у цифровому вигляді надходить на ПК, де за допомогою спеціальної програми, розробленої стосовно конкретного виду виробу, вирішується завдання теплової дефектометрії.

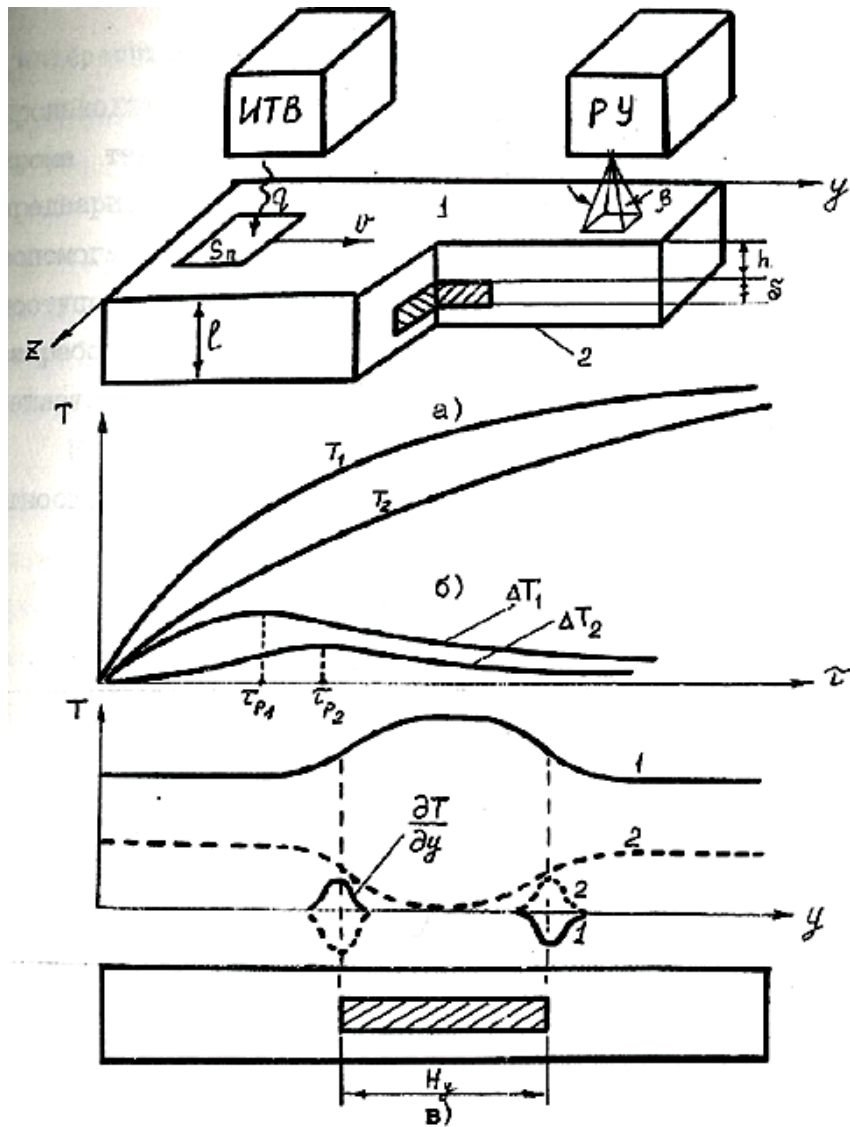


Рисунок 1.1 – а) схема проведення АТНК; б) залежність температури поверхні ОК та температурних перепадів від часу; в) розподіл температури над дефектом

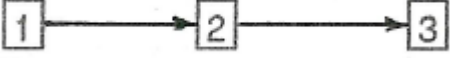
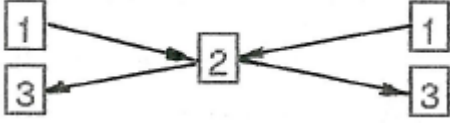


Фізична суть ТДМ.

Залежно від взаємного розташування ІТВ та РЧ відносно ОК можливі кілька способів ТДМ та ТТ (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1 – Стандартизовані методи АТНК

Спосіб контролю	Схема АТНК
1	2
Односторонній	

Продовження таблиці 1.1

1	2
Двосторонній	
Комбінований	
Синхронний	
Асинхронний	

Умовні позначення в таблиці:

- 1 – джерело нагріву (або ДТВ);
- 2 – об'єкт контролю;
- 3 – термочутливий елемент.

Сутність кожного способу полягає у наступному. При односторонньому АТНК реєструють розподіл температури на поверхні, що нагрівається. Дефектам, як правило, відповідають нагріті ділянки поверхні. При двосторонньому методі спостерігається зворотна картина: самі дефекти проявляють себе менш нагрітими ділянками. Комбінований спосіб дозволяє одержати (одночасно або по черзі) розподіл температури на обох поверхнях ОК.

У разі контролю більш складних у тепловому відношенні ОК виникає можливість надавати теплову дію, а також вимірювати температурний відгук на різних поверхнях або в різних точках ОК. Їх вибір є завданням оптимізації режиму контролю та визначається особливостями моделі ОК з дефектом.

Основна фізична модель ТДМ та деякі її якісні характеристики показані на рис.1.1. Об'єкт контролю нагрівається тепловим потоком q у плямі площею S_p (рис.1.1. а). Власне теплове випромінювання ОК сприймається РУ. При

розподіленому нагріві РУ реєструє нестационарну термограму великої ділянки ОК. Розвиток у часі середніх температур на нагрівається (1) і протилежній (2) поверхнях, а також відповідно температурні перепади від дефектів залежно від часу показані на рис.1.1.б, на відміну від завдання теплової дефектоскопії, де для прийняття рішення про наявність дефекту достатньо результатів миттєвого вимірювання температури, при ТДМ для однозначного визначення параметрів дефекту потрібно більш повна інформація про тепловий відгук - його як тимчасова $T(\tau)$, так і координатна $T(x)$ залежності теплового відгуку. При цьому кількість точок дискретизації обмежена роздільною здатністю тепловізора та вимогами до швидкодії процедури ТДМ. розподіл температури над дефектами, менш теплопровідними ніж основний матеріал, зображено малюнку 1.1в. Сигнали від дефектів носять згладжений характер, внаслідок чого визначення справжніх поперечних розмірів за їх поверхневими температурними відбитками важко. У зв'язку з цим особливу роль у вирішених задачах ТДМ відіграють моделі, в яких дефект характеризується деякими ефективними (інтегральними) значеннями параметрів.

Незважаючи на різноманітність методів і способів ТДМ, процес контролю визначається в основному одними і тими ж факторами, які можна розділити на геометричні групи (розміри і форма ОК і дефектів); теплофізичні (коефіцієнти тепловіддачі, теплопровідності λ та температуропровідності a); процедурні (повна потужність ІТБ, її просторовий та тимчасовий розподіл, час реєстрації). Сукупність всіх перерахованих факторів робить будь-яку процедуру ТДМ суттєво багатопараметричною. В емпіричних дослідженнях це вимагає постановки багатфакторного експерименту, а при теоретичному аналізі встановлення різноманітних функціональних залежностей, які, як правило, не піддаються аналітичному опису і повинні задаватися у вигляді графіків або таблиць. Вихідними для проведення ТДМ є результати вимірювання температурного поля на поверхні об'єкта. Зважаючи на швидкоплинність протікають в об'єкті процесів нестационарної теплопровідності вимірювання температури здійснюються безконтактним методом з власного теплового випромінювання об'єкта.

На відміну від ТДМ, завдання теплової томографії пов'язане з визначенням внутрішньої структури об'єкта контролю за даними вимірювання теплового відгуку на зовнішній тепловий вплив. При цьому може бути використана та сама інформація, що при ТДМ однак, враховуючи можливість розподіленого характеру дефекту, необхідні інші моделі та алгоритми обробки експериментальних даних.

1.2 Аналіз математичних моделей та методів, що використовуються для вирішення задач теплової дефектометрії та томографії

ТДМ заснована на вирішенні зворотного завдання нестационарної теплопровідності. Термін «зворотне» завдання відображає ту обставину, що в порівнянні з «прямим» завданням шукані та відомі величини змінюються місцями. У зв'язку з відсутністю прямих аналогій зворотному завданню (ОЗ) АТНК у фундаментальній теплофізиці, її рішення є багато в чому недослідженою проблемою.

З математичної погляду ОЗ АТНК некоректна, оскільки однієї комбінації вимірних значень температури лежить на поверхні можуть відповідати різні набори параметрів дефектів. Внаслідок цього рішення обернених завдань виявляються нестійкими щодо малих коливань вхідного параметра - температури. Зважаючи на особливості теплопровідності в об'єкті відбувається згладжування температурних аномалій за амплітудою та запізнювання їх за часом, що суттєво ускладнює ідентифікацію внутрішніх геометричних та теплофізичних характеристик за результатами вимірювання температури на поверхні. ТДМ ускладнення багатопараметричним характером теплових випробувань, сутність якого зводиться до того, що всі параметри дефекту та виробу спільно впливають на параметри температурного поля. Оцінка дефекту по одному параметру (значенню температурного перепаду в вибраній момент часу) неспроможна, оскільки, наприклад, одному й тому ж температурному перепаду може відповідати або дефект великого розміру на великій глибині, або малий дефект на меншій глибині. При двосторонньому АТНК

температурний перепад слабо залежить від глибини залягання дефекту, тому його використання неефективне. В односторонньому АТНК для дефектометрії рекомендується дві фундаментальні залежності: приблизно експоненційна зміна амплітуди температурних сигналів і близька до їх лінійного тимчасове запізнення при збільшенні глибини залягання дефектів. Однак і в цьому випадку не запропоновано узагальнених залежностей, і прості алгоритми дефектометрії можливі лише для конкретних виробів за фіксованих умов контролю.

Можна виділити дві групи способів вирішення ОЗ АТНК:

1) непрямі способи, засновані на використанні в тій чи іншій формі ітераційного вирішення прямої задачі АТНК та зближенні експериментальних та розрахункових даних;

2) способи, засновані на апроксимації геометричного розподілу ТФГ у дефектних структурах гладкими функціями та наступній заміні вихідного диференціального рівняння більш простим.

Відмінності у підходах пов'язані лише з вибором шляхів реалізації окремих етапів цього алгоритму: побудови теплофізичної моделі об'єкта, розв'язання прямої задачі, організації перебору варіантів цих рішень тощо [4].

Ця обставина дозволило виділити ознаки зіставлення робіт з ОЗ АТНК та скомпонувати їх основні дані у вигляді таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Ознаки зіставлення робіт з ОЗ АТНК

Джерело	Підхід до вирішення	Модель об'єкту		Модель об'єкту			Визначені параметри дефекту			
		Тип	Розмірність	Тип	Розмірність	Метод аналізу	h	δ	α	λ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
[2]	Перебір розв'язків задачі	Один із шарів пластини (нетеплопровідний)	1	Необмежена пластинка ГУ 3-го роду	1	Сітковий	+	+	-	-

Продовження таблиці 1.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
[6]	На основі наближеної апроксимаційної залежності	Один із шарів пластини (тепло провідний)	1	Необмежена пластина ГУ 2-го та 3-го роду	1	Сітковий	+	+	-	-
[6]	Ітераційний підбір параметрів дефектів	Один із шарів пластини (тепло провідний)	1	Необмежена пластина ГУ 2-го та 3-го роду	1	Сітковий	+	+	-	-
[3]	Чисельний розрахунок за наближеним аналітичним виразом	Один із шарів пластини (нетепло провідний)	1	Необмежена пластина ГУ 2-го та 3-го роду	1	Аналітичний наближений	+	+	-	-
[8]	Ітераційний перебір параметрів матриці об'єкта з мінімізації функціоналу	Один із шарів пластини (тепло провідний)	1	Необмежена пластина ГУ 2-го та 3-го роду	1	Сітковий	+	+	-	-
[4]	Ітераційний перебір рішень прямого завдання з мінімізації функціоналу	Один із шарів пластини (тепло провідний)	2	Рухома пляма нагріву	2	Сітковий	+	+	-	-
[7]	Знаходження за зміненим часом запізнення	Нетепло провідне включення довільного профілю	3	Напівнескінченна пластина з ГУ 2-го та 3-го роду	3	Емпіричний	+	-	-	-
[10]	Ітераційний. Мінімізація функціоналу	Один із шарів пластини	1	Необмежена пластина	1	Чисельно аналітичний	+	+	-	-

Продовження таблиці 1.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
[10]	На основі наближеної апроксимації	Простір між двома гауссої дами	3	Необмежена пластина з ГУ 2-го та 3-го роду	3	Сіт ковий	+	+	-	-

Крім того, показано можливість виявлення потовщень пластини. Приділено увагу методам зниження впливу шумів на результати ТДМ.

До недоліків використовуваної моделі та отриманих на її основі результатів слід віднести обумовлені зайвими спрощеннями моделі невирішені проблеми: облік поперечного розтікання тепла, визначення таких параметрів дефекту як його розкриття (товщина), теплоємність та поперечні розміри, оптимізація режиму заснованих на застосуванні інтегральних перетворень та вирішення зворотної завдання у сфері зображень.

Алгоритм динамічної теплової томографії передбачає накопичення пакета термограм виробу в процесі контролю, наприклад, в оперативній пам'яті тепловізора або довгостроковому носії, причому різночасні термограми є аналогом різноракурсних зображень у звичайній томографії [5]. Потім відбирають зображення гаданих дефектів, котрим максимум залежності $\Delta T(\tau)$ лежить у заданому інтервалі $\tau_i + \Delta\tau$. В силу однозначної залежності $\tau_p(h)$, ці зображення є тепловими томограмами виробу, на яких видно лише дефекти, що лежать у межах шару Δh_i .

У динамічній тепловій томографії дозвіл системи по глибині зводиться до дозволу але часу затримай $\Delta\tau_\epsilon$ яке пов'язане з рівнем шуму $\Delta T_{ш}$ системи контролю.

Як показали результати досліджень з томографії пластику, кількість шарів, що вирішуються, може досягати 8 – 10. Через невизначеність функції $\Delta T(\tau)$ поблизу максимуму, більш ефективні моменти часу, коли функція, що має вигляд $\Delta T(\tau) / \Delta T$, досягає рівнів 0,50 та 0,72. При такому підході кількість шарів може досягати 25 – 40.

Однак цей метод має ряд істотних недоліків, що не дозволяють його широко використовувати: алгоритм томографії будується без урахування розтікання тепла, а також розглядається лише випадок дефекту нетеплопровідного (повітряного), що значною мірою обмежує застосовність методу. Фактично можна визначити лише межа такого дефекту з похибкою, обумовленої одномірністю моделі.

В альтернативних методах розглядається дефект із довільними ТФГ, проте потрібна його однорідність, що ставить коректність розв'язання задачі в залежність від прийнятої моделі дефекту (паралелограм, циліндр, тонке розшарування тощо). Ці методи дозволяють для кожної з моделей скласти систему рівнянь та визначити кінцеву кількість невідомих параметрів, що можна класифікувати як розв'язання задачі дефектометрії. Зауважимо також, що існують різні ітераційні алгоритми розв'язання задачі дефектометрії, проте вони зводяться до багаторазового вирішення прямої задачі чисельним методом і дозволяють, як правило, варіювати не більше 1 – 2 параметрів дефекту.

Таким чином, завдання теплової томографії у тому вигляді, як це зроблено в інших методах контролю (рентгеноскопія, ЯМР, ультразвук), не вирішена її кінцева мета полягає у визначенні координатних залежностей ТФГ по всьому об'єму об'єкта, що контролюється.

Зазначимо, що в математичному відношенні аналогічним є алгоритм томографії за допомогою електричного імпедансу, заснований на розрахунку еквіпотенціалів та послідовних ітераціях [4]. Термоелектричні аналогії та метод передавальних функцій (МПФ) дозволяють побудувати аналогічний алгоритм для теплового поля.

Однак, основна перевага методу електричного імпедансу – швидкодія вимірювань імпедансів між безліччю пар точок на поверхні об'єкта, абсолютно неприйнятна для теплових методів. У переважній більшості випадків вимога продуктивності уможливорює лише одноразове нагрівання об'єкта контролю, що не дозволяє застосувати цей алгоритм у тепловій томографії.

На закінчення, слід ще раз підкреслити умовність терміну «теплова томографія», який більшою мірою визначає форму відбору, аналізу та подання

температурної інформації, ніж нові можливості АТНК. Наприклад, теплова томографія не може дозволити два повітряних розшарування, що перекривають один одного в плані. В цілому чутливість методу до невеликих змін ТФГ на глибині невелика, що поки що обмежує його застосування для виявлення дефектів у вигляді повітряних порожнин.

1.3 Результати огляду

Результати огляду свідчать, що метод ТДМ має великі перспективи подальшого розвитку та ширшого застосування. Він у ряді випадків дозволяє визначити один-два геометричні параметри дефекту з точністю 5 % – 50 %. Цими параметрами є глибина та розкриття дефекту в одновимірних моделях або глибина та поперечний розмір у дво-тривимірних.

В основі вирішення завдання ТДМ лежить, як правило, чисельна модель або наближена аналітична, заснована на апроксимації експериментальних залежностей. Найбільш переважними є інтегральні методи вирішення задачі, що розвиваються останнім часом, в основі яких лежить уявлення об'єкта контролю з дефектом у вигляді теплової передавальної функції.

При цьому підвищується інформативність, точність та швидкодія ТДМ.

Щодо теплової томографії, то цей метод теплового контролю почав розвиватися лише останнім часом [6]. Незважаючи на найбільшу значущість результатів розробки цього методу як у теоретичному так і в прикладному аспектах, поки не існує універсальних алгоритмів розв'язання задачі.

Аналіз сучасного стану методу ТДМ як у науковому, і у прикладних аспектах дозволяє сформулювати такі невирішені проблеми:

- неповнота або явна неточність вихідних даних, серед яких: коефіцієнт тепловіддачі α на зовнішніх поверхнях об'єкта. ТФХ об'єкта α та λ , товщина його верстата 1;
- великі витрати часу вимірювання залежності $T(\tau)$;
- необхідність контролю об'єкта (типу пластини) по обидва боки по черзі;

– наявність помилок у вихідній інформації, обумовлених одномірністю використовуваної моделі об'єкта;

– відсутність цілісного науково обґрунтованого підходу до вивчення закономірностей методу як сукупності фізичних явищ, результатом чого є фрагментарність і навіть хибність деяких результатів теоретичних досліджень. Це обумовлено як об'єктивними труднощами у вирішенні обернених завдань теплопровідності неоднорідних структур, і внесеними авторами не виправданими спрощеннями при побудові моделей, які призводять до втрати інформації як і якісному, і кількісному відношенні;

– підхід до дефектометрії, що склався, заснований на використанні малоефективного ітераційного методу до вирішення зворотної задачі, що істотно обмежує інформативність і швидкодію теплової дефектометрії. З шести характерних параметрів дефекту вдається визначити лише два - три і, як правило, поза реальним масштабом часу;

– відсутній алгоритм вирішення задачі теплової томографії для малих відхилень теплофізичних параметрів дефекту від параметрів об'єкта контролю.

2 ТЕПЛОВА ДЕФЕКТОМЕТРІЯ ВИРОБІВ З ДЕФЕКТАМИ МАЛИХ РОЗМІРІВ

2.1 Постановка задачі

У одновимірних моделях ТДМ із усіх геометричних параметрів дефекту визначаються лише два: його глибина та розкриття. У багатьох випадках цього виявляється достатнім для вирішення задачі дефектометрії, оскільки межі дефекту визначаються приблизно по межі області теплового перепаду $\Delta T(\tau)$ на поверхні. Це припустимо у разі, якщо дефект носить протяжний характер. Критерієм застосування одномірного наближення є відношення поперечного розміру дефекту L до його глибини залягання h . Хороші результати можна отримати, якщо $L / h > 3 \dots 4$.

Метод введення поправок дозволяє суттєво розширити сферу застосування одновимірної моделі: $L / h > 0,7$. Однак для дрібніших дефектів, а також у разі змінної товщини або глибини залягання дефекту зазначені методи не дозволяють отримати адекватний результат [6,7]. У зв'язку з цим актуальним стає завдання розробки двох-тривимірних моделей ТДМ. Тут застосування методу ТПФ також дозволяє отримати низку нових результатів і розробити алгоритми розв'язання задачі ТДМ для деяких типів об'єктів, для яких багатовимірність є важливим фактором.

2.2 Модель дефекту у вигляді еквівалентного розподіленого джерела тепла

Завдання теплової дефектометрії полягає у визначенні місця розташування дефекту, а також його теплофізичних та геометричних параметрів. Проте, внаслідок ефекту розтікання тепла, температурна залежність $T(r, \tau)$ зберігає особливості форми дефекту лише близькому від нього відстані. Тому, якщо глибина залягання дефекту значно перевищує його поперечні

розміри (малий дефект), визначення форми дефекту по поверхневому відгуку стає скрутним [8]. У зв'язку з цим необхідні спеціальна математична модель дефекту та відповідна їй методика розв'язання задачі дефектометрії. Для вирішення цієї проблеми також було використано метод передавальних функцій (МПФ).

Розглянемо спочатку модель дефекту, що є стороннє включення довільної форми в пластині. Процес поширення тепла у разі описується рівнянням теплопровідності з відповідними граничними умовами

$$\nabla(\lambda \nu T) = c \cdot \rho \cdot \frac{\partial}{\partial \tau} \cdot T + q_B, \quad (2.1)$$

де q – зовнішній тепловий вплив.

У цьому параметри λ і $c\rho$ приймають постійні значення λ_0 , $(c\rho)_0$ і λ_d , $(c\rho)_d$ відповідно в бездефектної області та об'ємом дефекту.

Оскільки в об'єкті, що не містить дефект, λ_0 і $(c\rho)_0$ від координат не залежить, рівняння (2.1) спрощується

$$\lambda_0 \cdot \nabla^2 \cdot T_0 = (c \cdot \rho)_0 \cdot \frac{\partial}{\partial \tau} \cdot T_0 + q_B. \quad (2.2)$$

Щоб отримати аналогічне рівняння для температурного перепаду $T(r, \tau)$, викликаного наявністю дефекту ($\nabla \cdot T = T - T_0$), віднімемо (2.2) (2.1).

Після перетворень отримаємо

$$\lambda_0 \cdot \nabla^2 \cdot (\Delta T) = (c \cdot \rho)_0 \cdot \frac{\partial}{\partial \tau} \cdot (\Delta T) + \left[\Delta(c \cdot \rho) \cdot \frac{\partial}{\partial \tau} \cdot T - \Delta\lambda \cdot \nabla^2 \cdot T - \Delta\lambda \cdot \Delta T_0 \right] \quad (2.3)$$

або

$$\lambda_0 \cdot \nabla^2 \cdot (\Delta T) = (c \cdot \rho)_0 \cdot \frac{\partial}{\partial \tau} \cdot (\Delta T) + \left[\Delta(c \cdot \rho) \cdot \frac{\partial}{\partial \tau} \cdot T_0 - \Delta\lambda \cdot \nabla^2 \cdot T_0 - \Delta\lambda \cdot \Delta T_0 \right]. \quad (2.4)$$

В цих виразах

$$\Delta(c \cdot \rho) = (c \cdot \rho) - (c \cdot \rho)_0;$$

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0.$$

З (2.3) видно, що температурний перепад у всьому об'єму пластини може бути представлений як відгук на теплову дію, яка описана членами квадратних дужках. Це еквівалентне джерело тепла (ЕДТ1) зосереджене об'ємом дефекту та її межі (там, де $\Delta\lambda$, $\Delta(c\rho)$, $\nabla\lambda$ не рівні 0).

Таким чином, дефект можна замінити ЕДТ1, що діє в бездефектній пластині; однак для розрахунку потужності ЕДТ11 необхідна інформація про $T(r, \tau)$ у пластині з дефектом. Тому в ряді випадків при вирішенні прямої задачі зручнішим є співвідношення (2.4). З нього випливає, що перепад $\Delta T(r, \tau)$ можна розглядати як відгук на ЕДТ2 у пластині з дефектом. При цьому ЕДТ2, так само як і ЕДТ1, локалізоване в об'ємі та на межі дефекту. Однак для обчислення його потужності достатньо знати розподіл температури у бездефектній пластині $T_0(X, \tau)$ (наведено на рисунку 2.1).

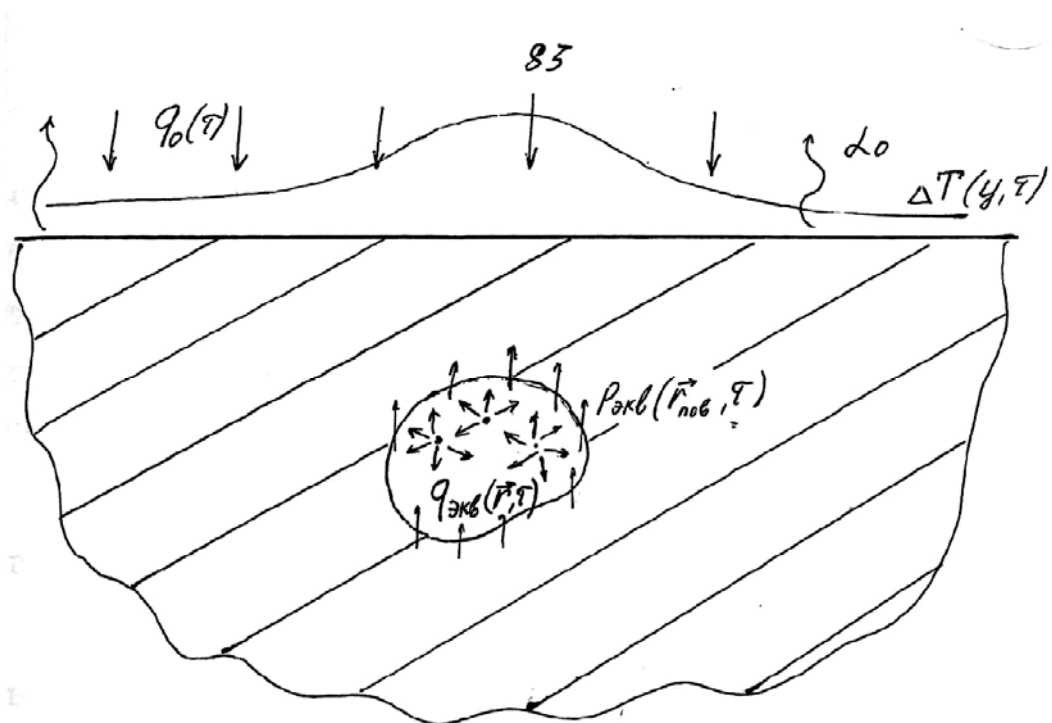


Рисунок 2.1 – Модель дефекту як еквівалентного джерела тепла

2.3 Застосування методу теплових передавальних функцій у двовимірних та тривимірних задачах теплової дефектометрії

У постановці (для малих дефектів) завдання дефектометрії не можна вважати одномірним. Тому описаний вище МПФ вимагає узагальнення на тривимірний варіант. Це можна зробити, застосовуючи перетворення Фур'є температурного відгуку $T(r,\tau)$ і теплового потоку $q(r,\tau)$ за змінними x, y, z , а не лише за часом, як у одновимірній моделі.

В результаті отримаємо узагальнену передатну функцію однорідного шару

$$I = \begin{vmatrix} \cos(k \cdot d) - \sin(k \cdot d) \\ \sin(k \cdot d) \cdot \cos(k \cdot d) \end{vmatrix}, \quad (2.5)$$

де d – товщина шару;

$$k = \sqrt{-\frac{1 \cdot \omega}{\alpha} - \omega_x^2 - \omega_y^2}.$$

Отримана функція дозволяє, зокрема, вирішити у загальному вигляді пряме завдання теплопровідності багатошарової пластини у тривимірному варіанті при неоднорідному тепловому впливі на її поверхню.

У задачі дефектометрії бездефектні області пластини, розташовані над і під дефектом, можна розглядати як однорідні шари та обчислювати їх передатну функцію за рівнянням (2.5), але прошарок між ними є неоднорідним, оскільки містить дефект [8]. Передаточна функція цього прошарку з прямокутним дефектом кінцевої ширини може бути представлена також в аналітичній формі. Однак, через (2.3) дефект можна замінити ЕДТ1 в бездефектній пластині. При цьому додаткове джерело тепла необхідно врахувати при записі граничних умов між двома однорідними шариками. Для тонких дефектів вважатимуться, що ЕДТ1 розташований глибини h .

У цьому випадку граничні умови між прилеглими до дефекту шарами можуть бути записані окремо для кожної із спектральних складових у наступному вигляді

$$\begin{aligned}\Delta\bar{T} \cdot (\bar{h} + 0, \omega_y, \omega_z, \omega) &= \Delta\bar{T} \cdot (\bar{h} - 0, \omega_y, \omega_z, \omega) + \frac{1}{\lambda_0 \cdot \bar{p}_h} \cdot (\omega_y, \omega_z, \omega); \\ \Delta\bar{Q} \cdot (\bar{h} + 0, \omega_y, \omega_z, \omega) &= \Delta\bar{Q} \cdot (\bar{h} - 0, \omega_y, \omega_z, \omega) - \bar{q}_h \cdot (\omega_y, \omega_z, \omega).\end{aligned}\quad (2.6)$$

де $\Delta\bar{T}, \Delta\bar{Q}$ – Фур'є-образи температурного перепаду $\Delta\bar{T}$ та додаткового теплового потоку $\Delta\bar{Q}$, викликаного наявністю дефекту;

\bar{q}_h, \bar{p}_h – Фур'є-образи ЕДТ1, що визначено з (2.3), (2.4).

2.4 Розв'язання задачі теплової дефектометрії розшарування зі змінним розкриттям

Пропонована модель тонкого дефекту в багат шаровій пластині дозволила розробити методику дефектометрії розшарування (наведено на рисунку 2.2) в тривимірному варіанті, суть якої полягає в наступному:

– вимірювання координатної та тимчасової залежності теплового впливу $q_B(y, z, \tau)$ та температурних відгуків $T_1(y, z, \tau)$ та $T_2(y, z, \tau)$ на обох поверхнях контрольованої пластини;

– визначення глибини h залягання розшарування шляхом обчислення інтегральних (за координатами y і z) залежностей $q_B^*(\tau), T_1^*(\tau), T_2^*(\tau)$ та розв'язання спрощеного варіанту завдання дефектометрії та одномірному наближенні (наприклад за допомогою описаного алгоритму);

– обчислення поверхневих відгуків у бездефектній пластині $T_{1,\delta/d}(\tau), T_{2,\delta/d}(\tau)$, температурних перепадів на її поверхнях $T_1(y, z, \tau), T_2(y, z, \tau)$ і, нарешті, Фур'є-образів цих перепадів і теплового впливу $\Delta\tilde{T}_1 \cdot (\omega_y, \omega_z, \omega), \Delta\tilde{T}_2 \cdot (\omega_y, \omega_z, \omega), \tilde{q}_B \cdot (\omega_y, \omega_z, \omega)$;

– обчислення на підставі передавальної матриці 1 (1.5) і з урахуванням

граничних умов (які також можуть бути записані у вигляді матриці) на поверхні, що нагрівається і протилежній цій поверхні пластини, Фур'є-образів температурного перепаду і теплового потоку в перерізі h з обох сторін $\Delta\tilde{T}_{h-0}$, $\Delta\tilde{Q}_{h-0}$, $\Delta\tilde{T}_{h+0}$, $\Delta\tilde{Q}_{h+0}$;

– обчислення за формулою (2.6) Фур'є-образів відповідного дефекту ЕДТ1: $\tilde{q}_h(\omega_y, \omega_z, \omega)$ і $\tilde{p}_h(\omega_y, \omega_z, \omega)$;

– обчислення за допомогою зворотного перетворення Фур'є оригіналів: $q_h(y, z, \tau)$, $p_h(y, z, \tau)$, $\Delta T_{h-0}(y, z, \tau)$ і $\Delta Q_{h-0}(y, z, \tau)$;

– обчислення похідних температурного перепаду: $\left. \frac{\partial}{\partial x} \cdot \Delta T(x, y, z, \tau) \right|_{x=h}$; $\left. \frac{\partial}{\partial \tau} \cdot \Delta T(h, y, z, \tau) \right|_{x=h}$ і, після складання з відгуком у бездефектній пластині, похідних теплового відгуку $\left. \frac{\partial}{\partial x} \cdot T(x, y, z, \tau) \right|_{x=h}$; $\left. \frac{\partial}{\partial x} \cdot T(h, y, z, \tau) \right|_{x=h}$;

– обчислення обчислення координатної залежності товщини розшарування $\delta(y, z)$ та узагальненої теплофізичної характеристики дефекту $(\Delta\lambda/\lambda)$ та $(\alpha/\Delta\alpha)$ за формулами:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \cdot \frac{\alpha}{\Delta\alpha} = \frac{p_h}{q_h \cdot \alpha_0} \cdot \frac{\left. \frac{\partial}{\partial \tau} \cdot \Delta T(h, y, z, \tau) \right|_{x=h}}{\left. \frac{\partial}{\partial x} \cdot \Delta T(x, y, z, \tau) \right|_{x=h}};$$

$$\delta(y, z) = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \cdot \frac{p_h}{\lambda_0} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left[\Delta T(x, y, z, \tau) \right]_{x=h}^{-1}. \quad (2.7)$$

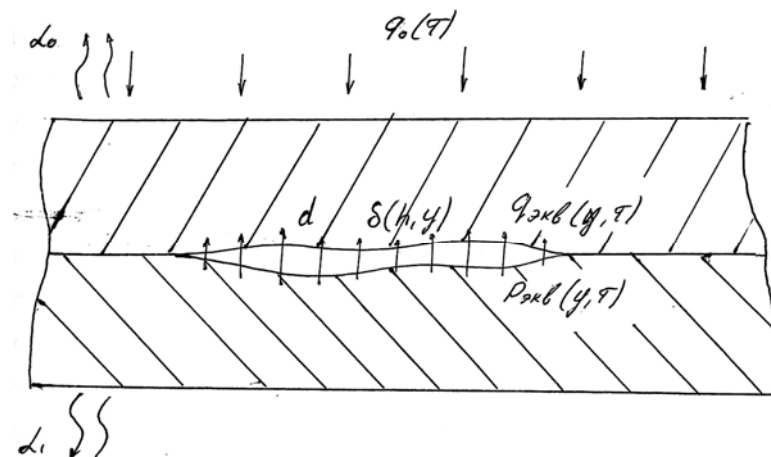


Рисунок 2.2 – Модель розшарування у протяжному об'єкті контролю

Л.Д. Фавро та інші запропонували алгоритм «зворотного розгорнення», що дозволяє реконструювати функцію розподілу плоского дефекту. Незважаючи на те, що і в цьому, і в запропонованому нами методі багато спільного існує і принципова відмінність. Воно полягає у наступному. У згаданому алгоритмі функція $q(x-x', y-y', \tau-\tau')$ фактично визначає лише один із чотирьох коефіцієнтів передавальної матриці однорідного шару.

У той же час розгляд усіх коефіцієнтів узагальненої передавальної матриці в МПФ дозволяє врахувати особливості зовнішнього теплового впливу, граничні умови на поверхні, що нагрівається і протилежної, і визначити не тільки межі дефекту, але і його форму $\delta(y, z, \tau)$ [9].

Пропонований метод може бути узагальнено і на односторонній контроль.

При цьому, однак, можна обчислити лише відношення виду:

$$\frac{\tilde{q}_h(\omega_y, \omega_z, \omega)}{\tilde{p}_h(\omega_y, \omega_z, \omega)}.$$

Для розшифрування параметрів дефекту виходячи з цієї залежності потрібно більш складний математичний алгоритм.

2.5 Теплова дефектометрія навколорогових дефектів

Для малих дефектів, таких як раковини, тонкі розшарування тощо величини $\frac{\partial}{\partial x} \cdot \Delta T$ та $\frac{\partial}{\partial \tau} \cdot \Delta T$ в об'єму дефекту вважатимуться постійними.

Тоді відповідно (1.3) перші два з входять до ЕДТІ доданків можна розглядати як розташоване на глибині h джерело тепла q_h

$$q_h(y, z, \tau) = \frac{\Delta(c\rho) \cdot \lambda - (c\rho) \cdot \Delta\lambda}{\lambda} \cdot \frac{\partial}{\partial \tau} \cdot \Delta T(h, y, z, \tau) \cdot \delta(y, z), \quad (2.8)$$

а останній доданок – додаткове джерело тепла у вигляді диполя p_h

$$p_h(y, z, \tau) = \Delta\lambda \cdot \frac{\lambda_0}{\lambda} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \cdot \Delta T(x, y, z, \tau) \Big|_{x=h} \cdot \delta(y, z). \quad (2.9)$$

Таким чином, температурний перепад, створюваний тонким дефектом, розташованим на глибині h можна розглядати як відгук у однорідній пластині на джерело тепла q_h і тепловий диполь p_h параметри яких однозначно визначаються параметрами дефекту. У тому випадку, коли і поперечні розміри дефекту малі, q_h та p_h , можна розраховувати за формулами

$$q_h(\tau) = \frac{\Delta(c\rho) \cdot \lambda - (c\rho) \cdot \Delta\lambda}{\lambda} \cdot \frac{\partial}{\partial \tau} \cdot \Delta T(h, y_0, z_0, \tau); \quad (2.10)$$

$$p_h(\tau) = \Delta\lambda \cdot \frac{\lambda_0}{\lambda} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \cdot \Delta T(x, y, z, \tau) \Big|_{x=h} \cdot V, \quad (2.11)$$

де h, y_0, z_0, V – відповідно координати центру малого дефекту та його об'єм.

У цьому випадку кількість інформативних параметрів, що характеризують дефект, дорівнює двом. Процедура їхнього розшифрування, порівняно з дефектометриєю розшарування, значно спрощується. При цьому достатньо відповідно до методики дефектометрії розшарування визначити параметри $q_h(\omega)$ та $p_h(\omega)$, тільки для нульових значень просторових частот $(\omega_y, \omega_z, \omega)$.

Це можна зробити не вдаючись до перетворення Фур'є, а обчислюючи інтегральний відгук (за координатами y та z). В результаті, виходячи з викладеної вище методики, можна обчислити глибину залягання малого дефекту, його узагальнений теплофізичний параметр $(\Delta\lambda/\lambda)$ та $(\alpha/\Delta\alpha)$ і (використавши додатково інформацію про матеріал дефекту) – його об'єм V .

Основним недоліком одновимірних моделей (як одностороннього, так і двостороннього контролю) є відсутність урахування ефекту «розтікання тепла» над дефектом.

Це обмежує їх застосування протяжними дефектами або вимагає запровадження відповідних поправок. Але це не що інше, як відповідний нульовий момент цієї функції. Таким чином, метод моментів, що застосовується не лише до тимчасової, а й до координатної залежності теплового відгуку, дозволяє вирішувати завдання теплової дефектометрії у двовимірній та тривимірній моделях.

Подібне завдання вже вирішено для дефектів малої товщини ($\delta \ll 1$) за допомогою МПФ і дозволяє визначити глибину залягання дефекту h і координатну залежність його товщини $\delta(y,z)$. Однак, процедура рішення розроблена тільки для випадку двостороннього нагріву і має ряд недоліків, зазначених вище [10]. Застосування методу моментів для двовимірної моделі дозволяють їх усунути, хоча знижує інформативність дефектометрії (визначається не залежність $d(y,z)$, а ефективна товщина d і ширина N_y дефекту).

Алгоритм дефектометрії, заснований на методі моментів, у принципі відтворює послідовність дій, запропоновану для вирішення аналогічної задачі за допомогою методу передавальних функцій. Але замість спектра координатних і часових частот вимірюваних, залежностей використовуються лише необхідні моменти. Пропонований алгоритм полягає в наступному:

– визначення нульового та першого моментів тимчасових залежностей теплового впливу $q^{(0)}$, $q^{(1)}$ та теплового відгуку на поверхні пластини у бездефектній області $T_{\text{бд}}^{(0)}$, $T_{\text{бд}}^{(1)}$;

– визначення моментів тимчасової та координатної залежностей теплового відгуку над дефектом відповідно до формул:

$$\begin{aligned} T_{\text{д}}^{(0.0)} &= \int_{-\infty}^{\infty} \int T_{\text{д}}(y, \tau) dy d\tau, \\ T_{\text{д}}^{(1.0)} &= \int_{-\infty}^{\infty} \int T_{\text{д}}(y, \tau) \tau dy d\tau \\ T_{\text{д}}^{(0.2)} &= \int_{-\infty}^{\infty} \int T_{\text{д}}(y, \tau) y^2 dy d\tau \end{aligned} \quad (2.12)$$

– обчислення значень Фур'є-образів функцій та відповідних вимірним моментом похідних при $w = 0, w_y = 0$, взявши за основу

$$\int_{-\infty}^{\infty} \tau_n \cdot y_m(\tau, y) d\tau dy = \left(\frac{1}{2 \cdot \pi} \right) \cdot F_{(0,0)}^{(n,m)}; \quad (2.13)$$

– обчислення об'єму дефекту, взявши за основу спрощену модель розтікання тепла, за формулою

$$V = \frac{\left[T_{\Delta}^{(0,0)} - T_{\delta/\Delta}^{(0)} \cdot S \cdot \lg^{(0)} \right]^2}{\left[q^{(0)} - \alpha_0 \cdot T_{\delta/\Delta}^{(0)} \right]^2} \cdot \frac{\lambda \cdot \lambda_{\Delta}}{\lambda - \lambda_{\Delta}}, \quad (2.14)$$

де S – площа інтегрування (там де ΔT відмінне від нуля);

– знаходження глибини залягання дефекту h із формули

$$\frac{T_{\Delta}^{(1,0)} - T_{\delta/\Delta}^{(1)}}{T_{\Delta}^{(0,0)} - T_{\delta/\Delta}^{(0)}} - \frac{q^{(1)}}{q^{(0)}} = \frac{(\alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_0 \cdot \alpha_1 \cdot R)}{\Delta R \cdot \alpha_1^2} \cdot \Delta \cdot \left(\frac{D'_{21}(0) - \alpha_1 \cdot B'_{12}(0)}{\alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_0 \cdot \alpha_1 \cdot R} + \frac{(1 + \alpha_1 \cdot R) \cdot (B'_{21} - \alpha_1 \cdot B'_{11} - \alpha_0 \cdot B'_{22} + \alpha_0 \cdot \alpha_1 \cdot B'_{12})}{(\alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_0 \cdot \alpha_1 \cdot R)^2} \right), \quad (2.15)$$

де Δ – це знак, що означає, як і для температурного перепаду, різницю між значенням виразу для дефектного та бездефектного шарів;

– обчислення значень Фур'є-образів температурного відгуку та теплового потоку, а також їх приватних похідних на глибині h з урахуванням їх значень на поверхні пластини, що нагрівається, і відомих значень коефіцієнтів узагальненої передавальної матриці бездефектного шару товщиною δ ;

– обчислення ефективної ширини дефекту за формулою:

$$H_y = \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{\Delta T_h^{(0.2)} - \left(\frac{h}{\lambda} - \frac{1}{\alpha_1} \right) \cdot \Delta Q_h^{(0.2)}}{\Delta T_h^{(0.0)} - \left(\frac{h}{\lambda} - \frac{1}{\alpha_1} \right) \cdot \Delta Q_h^{(0.0)}} \right), \quad (2.15)$$

де h – це індекс, що позначає значення параметра на глибині h , а верхні індекси – порядок моментів функції часу і поперечної координати y .

Узагальнення запропонованої методики дефектометрії тривимірну модель шляхом введення ще однієї координати Z очевидно. Таким чином, пропонується процедура дефектометрії одностороннім тепловим методом дозволяє визначити глибину, товщину та ефективну ширину дефекту, спираючись на апріорні дані про бездефектну пластину та ТФХ дефекту.

Для обчислення параметрів необхідно обчислити три моменти – $T_d^{(0.0)}$, $T_d^{(1.0)}$, $T_d^{(0.2)}$ функції температурного відгуку над дефектом і моменти $q^{(0)}$, $q^{(1)}$, $T_{\delta d}^{(0)}$, $T_{\delta d}^{(1)}$ теплового впливу та температурного відгуку в бездефектній області. Додатково ця інформація дозволяє контролювати ще два параметри бездефектної пластини або граничні умови (коефіцієнти тепловіддачі) на її поверхнях.

Результати обчислювального експерименту, проведеного для одновимірної моделі при двосторонньому повторному нагріванні показали, що стійкість до похибок апріорних даних на порядок вища, ніж у методі передатних функцій для аналогічної моделі. Одночасно значно скорочується необхідний для розрахунків час за рахунок заміни трансцендентних рівнянь, присутніх у МПФ, алгебраїчними та вирішення деяких із них у загальному вигляді.

2.6 Особливості вирішення дво- та тривимірних завдань теплової дефектометрії у разі неоднорідних граничних умов

Одним із суттєвих факторів, що обмежують застосовність розроблених для вирішення двовимірних та тривимірних завдань ТДМ методик, є

припущення про однорідність граничних умов (розподілена пляма нагріву та сталість коефіцієнта тепловіддачі α на поверхні ОК). Поряд із труднощами, що виникають при забезпеченні цього режиму (і неминучими при цьому додатковими похибками), зазначений режим може виявитися неоптимальним по відношенню до вимог чутливості та енергоємності. У зв'язку з цим актуальним є завдання узагальнення методик ТДМ на випадок неоднорідних граничних умов [11]. У випадку граничних умов третього роду поверхні ОК вони задаються функціями $q(y, z)$ і $\alpha(y, z)$. І якщо неоднорідність нагріву $q(y, z)$ може бути легко врахована в старій моделі за рахунок проведення додаткових інтегральних перетворень за координатами (y, z) внаслідок чого ТПФ збереже колишній вигляд, то координатна залежність коефіцієнта тепловіддачі α призводить до неможливості скористатися передавальною матрицею граничних умов. В результаті інтегрального перетворення вихідних граничних умов ми отримуємо набір функцій $\alpha(w_y, w_z)$ і $T(w_y, w_z)$

$$Q(w_y, w_z) - \alpha(w_y, w_z) \cdot T(w_y, w_z, 0) = -\lambda \cdot \frac{\partial}{\partial x} \cdot T(w_y, w_z, 0) = Q(w_y, w_z, 0), \quad (2.16)$$

І оскільки функції $T(w_y, w_z, 0)$ та $Q(w_y, w_z, 0)$ пов'язані, як і раніше. За допомогою коефіцієнтів передавальної матриці (для одностороннього контролю) ми отримуємо інтегральне рівняння

$$\frac{1 \cdot k \cdot \lambda \cdot T + \alpha \cdot T - q}{1 \cdot k \cdot \lambda \cdot T - \alpha \cdot T + q} = \frac{1 - \mu^2}{1 - 2 \cdot \mu \cdot \text{cth}(-1 \cdot k_d \cdot \delta)} \cdot \exp(-2 \cdot 1 \cdot k \cdot h), \quad (2.17)$$

де k, k_d – коефіцієнти, що визначаються (1.5).

Аналогічно вирішується завдання двостороннього контролю. Загалом будемо мати систему двох інтегральних рівнянь щодо функцій $T(0, y, z)$ та $T(1, y, z)$, яку можна вирішити одним із стандартних методів.

2.7 Теплова дефектометрія на основі представлення об'єкта контролю ланцюгом теплових провідників

Методичні аспекти ТК включають цілий комплекс оптимізаційних завдань. Першою є завдання вибору оптимального способу ТК. Для найпростіших об'єктів типу багатошарової пластини це одно-або двосторонній контроль, точковий або розподілений нагрівання, амплітудний, контрастний або часовий критерій дефектності і т.п. З нею пов'язані завдання вибору розмірів плями сканування, швидкості сканування, рівня відсічення шумів, алгоритму обробки термограм, отриманих з тепловізора.

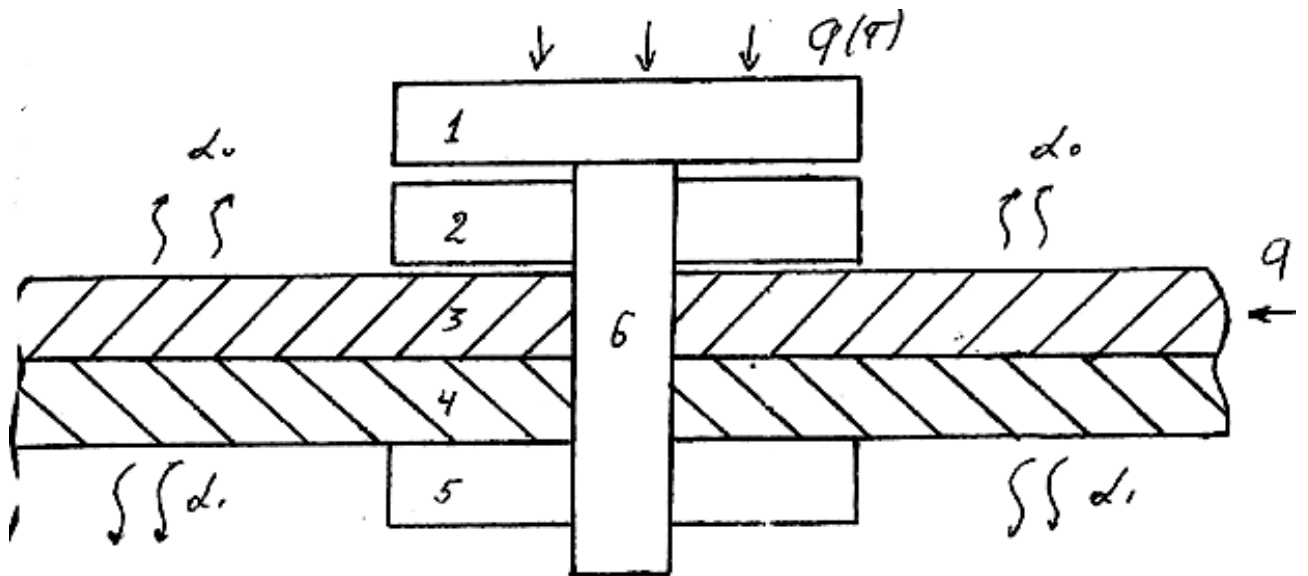
Метою оптимізації є підвищення продуктивності, точності контролю, спрощення та здешевлення процедури, підвищення її надійності. У світовій практиці теплового контролю напрацьовано великий обсяг інформації щодо вирішення подібних завдань. Разом з тим у переважній більшості випадків розглядається лише найпростіша модель об'єкта контролю у вигляді плоскої пластини з тривалим дефектом. А в тих випадках, коли враховується специфіка об'єкта контролю, результати мають приватний характер.

У зв'язку з цим нами було розглянуто завдання моделювання об'єкта контролю ланцюгом теплових провідників та вибору оптимального режиму контролю для цієї моделі.

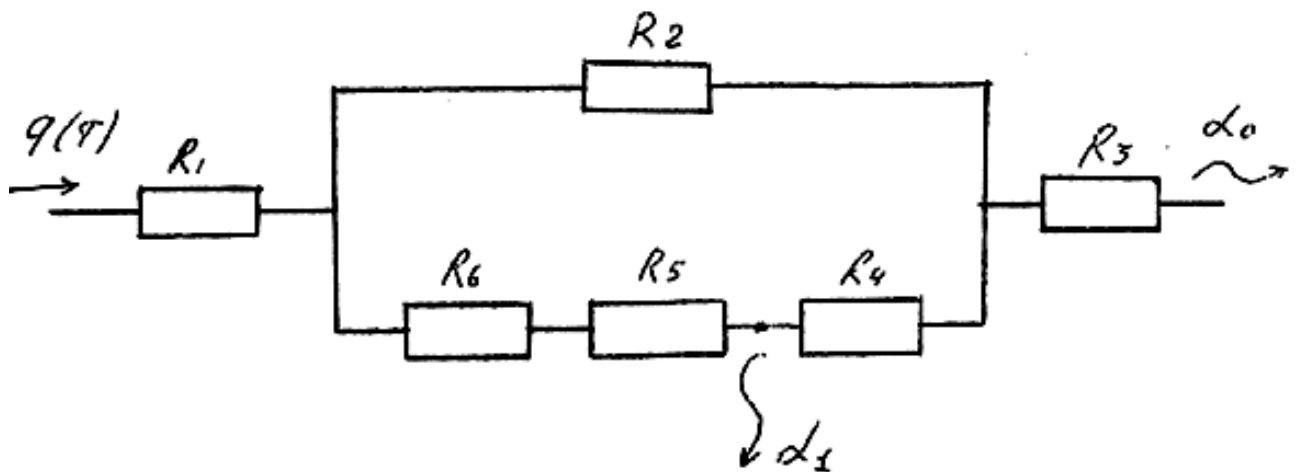
Очевидним узагальненням МПФ є його розширення тривимірну модель. У першому наближенні багатовимірність завдання може бути змодельована ланцюгом послідовно та паралельно з'єднаних одномірних провідників тепла. У вузлах цього ланцюга можуть бути задані стандартні граничні умови та довільні теплові дії.

Для такої схеми дисертант розроблено правила обчислення ПФ при послідовному і паралельному з'єднанні провідників.

Приклад теплової схеми болтового з'єднання РЕА наведено на рисунку 2.3. Таким чином, може бути отримано аналітичне вираз ПФ між будь-якими двома вузлами схеми.



a)



б)

Рисунок 2.3 – Схема болтового з'єднання в радіоелектронній апаратурі (а)
та її еквівалентна теплова схема (б)

З іншого боку, якщо в одному з вузлів заданий тепловий вплив $q_1(\tau)$, а в іншому – вимірюється залежність $T_k(\tau)$, то ми можемо обчислити експериментальне значення комплексного коефіцієнта $R_{ik}(\omega)$ теплової передавальної матриці R . Використовуючи метод моментів ми можемо відповідно виміряти моменти $q_1(\tau)$, $T_k(\tau)$ і обчислити моменти $R_{ik}(\omega)$.

Прирівнюючи отриманим значенням відповідні аналітичні вирази, ми отримуємо систему рівнянь алгебри щодо параметрів об'єкта контролю. Вирішуючи цю систему, ми можемо визначити значення контрольованих параметрів, якими можуть бути, зокрема, параметри дефекту. Запропонована схема теплової дефектометрії є універсальною, але її застосовність обмежена адекватністю прийнятої моделі та рівнем шумів [12]. Як було показано вище, ці фактори пов'язані один з одним. (При високому рівні шумів уточнення моделі за рахунок ускладнення її структури та введення додаткових параметрів втрачає сенс).

Пропонується наступна процедура побудови алгоритму теплової дефектометрії для конкретного об'єкта:

- попередня оцінка відносного рівня сигналу на різних поверхнях об'єкта контрольованого при максимально допустимих теплових впливах;
- підрахунок загальної кількості моментів p сигналів $T_d(\tau)$, які можуть бути виміряні з необхідною точністю;
- підрахунок загальної кількості m апріорних даних, відомих з необхідною точністю.
- побудова спрощеної структурної схеми об'єкта із загальною кількістю параметрів, що не перевищує $(n + m)$;
- висновок аналітичних виразів перших моментів коефіцієнтів R (у необхідній кількості).
- подання моментів $R_{ik}(\omega)$ через моменти вимірюваних відгуків $T_1(\tau)$ та вхідних впливів (τ) та складання програми вирішення отриманої системи рівнянь.

Зазначимо, що можливе спрощення процедури вирішення зворотного завдання у кожному конкретному випадку. Для цього необхідно шляхом підстановки відомих параметрів моделі алгоритм вирішення прямої задачі «звучить» по можливості ту частину об'єкта контролю, для якого повинна вирішуватися зворотне завдання. У випадку ми отримаємо значення

коефіцієнтів передавальної матриці одного елемента ланцюга, що містить дефект.

Цей елемент може бути розглянутий як одномірний шар з дефектом, і обернена задача для нього вирішується одним з описаних вище способів.

Запропонована методика носить універсальний характер і може бути застосована для будь-якої моделі об'єкта контролю, в якій можна виділити вузли або поверхні активного теплового впливу на нього та вимірювання температурного відгуку. А також ввести параметри дефекту в передавальну матрицю між цими вузлами.

Зазначимо, що точність вимірювання моментів зменшується з підвищенням їхнього порядку за рахунок сильнішого впливу шумів. Тому, хоча метод моментів і допускає у принципі визначення всіх параметрів теплофізичної моделі, насправді інформативність процедури контролю (кількість контрольованих параметрів) визначається максимальною кількістю достовірно виміряних моментів (фактично відносним рівнем шуму) [12].

Таким чином, на відміну від відомих алгоритмів дефектометрії, метод моментів дозволяє коригувати алгоритм залежно від рівня шумів та не визначати свідомо недостовірних параметрів.

2.8 Оцінка чутливості теплової дефектометрії на основі методу ТПФ

Оцінка чутливості теплової дефектометрії є найважливішим теоретичним завданням. Її рішення дозволить апріорно визначати ефективність теплового контролю для конкретних об'єктів та обирати найбільш прийнятний метод проведення контролю. В даний час, як показує аналіз літературних даних, запропоновано кілька способів вирішення цього завдання, які, однак, мають ряд недоліків.

Так, наявні таблиці чутливості, отримані методом чисельного моделювання мають великий крок дискретності і розраховані лише для одновимірної тришарової моделі для нагрівання постійним розподіленим тепловим потоком.

Всі ці обмеження значно знижують їхню ефективність і точність при практичному використанні. Альтернативний метод оцінки використовує для теплового відгуку залежності, отримані методом зшивання аналітичних рішень для декількох простих моделей.

Недоліком цього підходу є необґрунтованість припущення про гладкість узагальненої залежності і, як наслідок, більша похибка отриманих апроксимацій (до 100%).

У зв'язку з цим актуальною є завдання отримання аналітичних співвідношень для оцінки чутливості теплової дефектометрії на основі викладеного вище підходу.

Точність методу теплової дефектометрії обмежена шумами. В рамках МПФ шар пластини над дефектом можна розглядати як фільтр низьких частот відповідно до виразу для передавальної матриці цього шару (2.5).

Це означає, що на поверхні пластини перепад $\Delta T(x, y, \tau)$, викликаний ЕДТІ, розташованим на глибині h , має достовірне (на фоні шумів) значення тільки в обмеженому діапазоні частот $\omega_y < \omega_{y_0}$, $\omega_z < \omega_{z_0}$, $\omega < \omega_0$.

Відповідно до теореми Котельникова такий сигнал може бути заданий значеннями в дискретних точках, відстань між якими можна інтерпретувати як лінійний дозвіл теплової дефектометрії за координатами (y, z, x) , причому x пов'язана з τ [13]. Перехід від частот до відповідних координат здійснюється за співвідношенням

$$\Delta y = \frac{2 \cdot \pi}{\omega_{y_0}}; \Delta z = \frac{2 \cdot \pi}{\omega_{z_0}}; \Delta x = \frac{2 \cdot \pi}{\omega_0} \cdot \frac{2 \cdot \alpha}{h^2}. \quad (2.18)$$

Межі спектру можна оцінити, порівнюючи спектральні щільності амплітуди шуму та температурного перепаду на поверхні пластини на частотах ω_{y_0} , ω_{z_0} , ω_0 .

Ці умови можуть бути записані наступним чином

$$\eta(\omega_0) \cdot \frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\text{рад}}} \cdot \frac{\exp(-\xi) \cdot B_i}{\sqrt{(\xi + B_i)^2 + \xi^2}} = 1;$$

$$\eta_1(\omega_{y_0}, \omega_{z_0}) \cdot \frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\text{рад}}} \cdot \frac{\exp(-\xi) \cdot B_i}{(\xi_1 + B_i)} = 1,$$

де
$$\xi = \sqrt{\frac{\omega_0}{2 \cdot \alpha \cdot h}}; \xi_1 = \sqrt{\omega_{y_0}^2 + \omega_{z_0}^2}; B_i = \frac{\alpha \cdot h}{\lambda_0}; \quad (2.19)$$

$\frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\text{рад}}}$ – відносний рівень сигналу над центром дефекту.

Функції $\eta(\omega_0)$ і $\eta_1(\omega_{y_0}, \omega_{z_0})$ мають максимум при нульових значеннях частот і не перевищують 1. Їх конкретний вид визначається такими факторами, як форма дефекту $\delta(y, z)$, спектральна щільність шуму і т.п.

Таким чином, записані співвідношення дозволяють оцінити вплив на роздільну здатність теплової дефектометрії таких факторів, як теплофізичні параметри пластини, глибина залягання дефекту, а також максимальний рівень сигналу за інших рівних умов [13].

При зменшенні поперечних розмірів дефекту (наприклад H_y) зменшується ΔT_{\max} і, відповідно до (2.18), (2.19), звужується спектр просторових частот, що розпізнаються на фоні шумів, а роздільна здатність дефектометрії погіршується.

Якщо $H_y < 2 \cdot \pi / \omega_{y_0}$, то сигнал від такого дефекту та від його точкової моделі (2.10), (2.11) невиразні. У цьому випадку кількість інформативних параметрів, що характеризують дефект, дорівнює двом.

3 ОХОРОНА ПРАЦІ

3.1 Аналіз умов праці

Науково-дослідна лабораторія (НДЛ) має розміри: довжина 14 м, ширина 8,5 м, висота 4 м. Кількість робочих місць 12. У приміщенні встановлені 6 апаратів для паяння, оскільки при проведенні досліджень проводиться монтаж та паяння різних елементів [14]. Також на інших робочих місцях встановлено ПК: монітори LCD; споживана потужність 400 Вт; ЦПУ – Intel Core i7 (4790); оперативна пам'ять типу DDR3 (1833 МГц) – 16 Гб. На кожну людину припадає площа 9,91 м² та об'єм 39,6 м³, що відповідає вимогам ДСанПІН 3.3.2–007–98 «Державні санітарні правила і норми» .

Гігієнічні вимоги до організації роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин»: на одного працівника у приміщенні, оснащеному ЕОМ, площа не менше 6 м² та об'єм не менше 20 м³ та 4,5 м² та 15 м³ відповідно для робочих місць без ПК.

На рисунку 3.1 наведено функціональну схему обладнання на робочому місці працівника лабораторії.



Рисунок 3.1 – Функціональна схема обладнання на робочому місці інженера

Технічні характеристики обладнання: паяльник – вхідна напруга – 220 В, потужність – 25 Вт; Осцилограф "Rigol" – вхідна напруга – 220 В, споживана потужність – 50 Вт.

Все це обладнання, при досягненні своїх функціональних характеристик здатне виділяти зайве тепло, що, своєю чергою, впливає негативно на стан працівника наукової лабораторії.

Внаслідок гігієнічної оцінки умов праці визначили, що робоче місце працівника НДЛ належить до третього класу першого ступеня шкідливості. Одним із шкідливих факторів є напруженість аналізаторських функцій – зору. Для усунення необхідно дотримуватись раціонального режиму праці та відпочинку працівників з наданням їм регламентованих перерв для проведення спеціальної зорової та загальної гімнастики з урахуванням зорово-напружених робіт за комп'ютером.

Переважаючий небезпечний фактор – підвищене значення напруги в електричному ланцюзі, замикання якого може статися через тіло людини.

3.2 Забезпечення виробничої санітарії за умов виробництва

Технічний та організаційний рівень робочих місць відповідає умовам, що описані в ГОСТ 12.2.032–78 ССБП. «Робоче місце під час виконання робіт сидячи. Загальні ергономічні вимоги (2.2.032–78)». Робочі місця відносно світлових отворів розташовуються так, що природне світло падає з лівого боку, розташовані на відстані 1 м від стін зі світловими отворами.

Конструкція робочого місця повинна забезпечувати підтримку оптимальної робочої пози з такими ергономічними характеристиками:

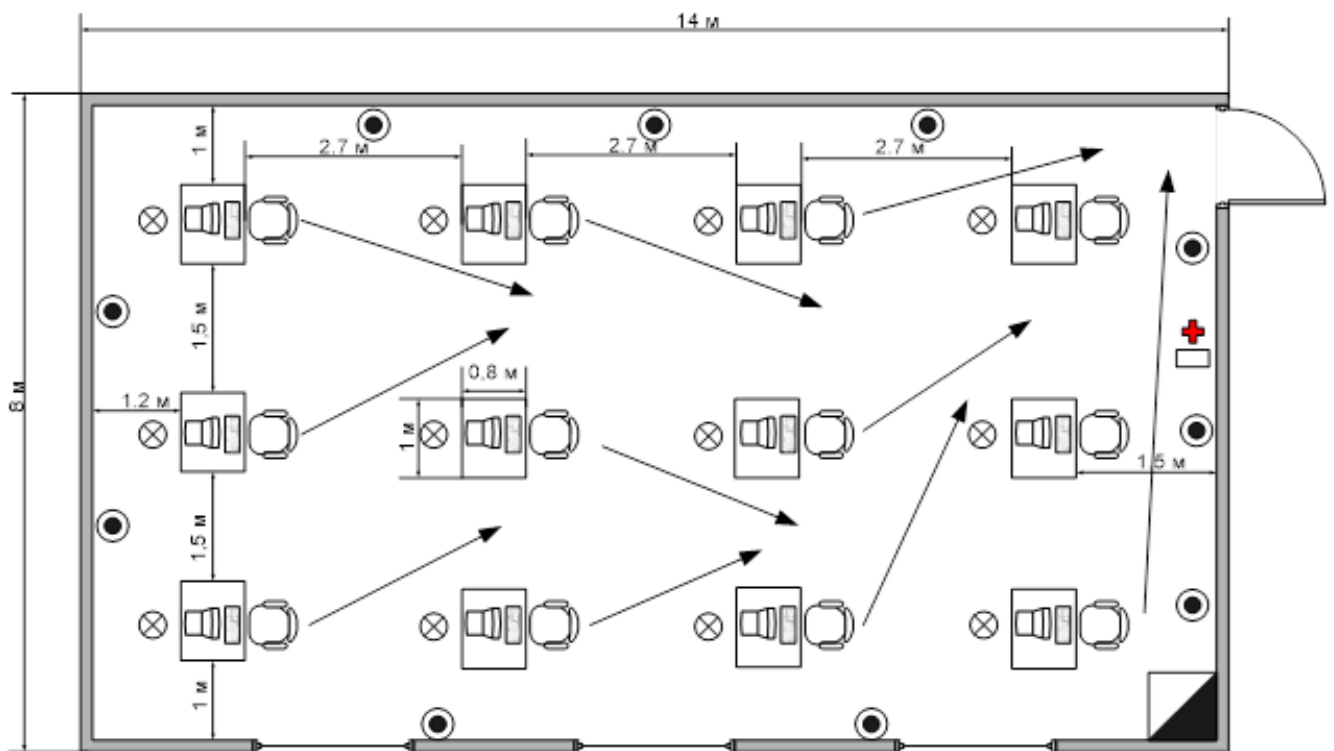
- стопи ніг – на підлозі або на підставці для ніг;
- стегна – у горизонтальній площині;
- передпліччя – вертикально;
- лікті – під кутом $70^{\circ}\text{C} - 90^{\circ}\text{C}$ до вертикальної площини;
- зап'ястя – зігнуті під кутом трохи більше 20°C відносно горизонтальної площини;
- нахил голови – $15^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}$ відносно вертикальної площини.

Робочі місця розташовані у два ряди. Апарати для паяння знаходяться на дерев'яних столах. Висота робочої поверхні столу становить 725 мм, ширина –

800 мм, глибина – 1000 мм. Робочий стіл має простір для ніг заввишки щонайменше 600 мм, шириною 500 мм, глибиною на рівні колін 450 мм, глибиною на рівні витягнутої ноги 650 мм. Робочий стіл обладнаний підставкою для ніг шириною 300 мм, глибиною 400 мм з можливістю регулювання по висоті в межах 150 мм та кута нахилу опорної поверхні – в межах 20 °С, що має рифлену поверхню та борт на передньому краї, висота якого становить 10 мм [15].

Робоче сидіння – підйомно-поворотне та регулюється: по висоті, куту нахилу сидіння та спинки, по відстані спинки до переднього краю сидіння, висоті підлокітників [16].

На рисунку 3.2 наведено план розміщення робочих місць.



Умовні позначення: ● – вогнегасник; ⊗ – датчик диму;

⊕ – аптечка; ▴ – ящик з піском

Рисунок 3.2 – План розміщення робочих місць

У лабораторії метеорологічні параметри підтримуються відповідно до ДСН 3.3.6.042–99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» та становлять:

- у холодний період: температура повітря в межах 22 °С – 24 °С, відносна вологість 40 % – 60 % та швидкість руху повітря близько 0,1 м / с;
- у теплий період: температура повітря в межах 23 °С – 25 °С, відносна вологість 40 % – 60 % і швидкість руху повітря близько 0,1 м / с.

Підтримка значень метеорологічних параметрів на оптимальних значеннях забезпечується за рахунок радіаторів центрального опалення в холодний період та припливно-витяжної вентиляції у теплий період [17].

Рівень шуму в приміщенні лабораторії становить близько 50 дБ, що не виходить за межі допустимого значення згідно ДСН 3.3.6.037–99 «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку».

Приміщення мають природне та штучне освітлення, рівень якого відповідає ДБН В.2.5–28:2018 «Природне і штучне освітлення».

Природне висвітлення забезпечує коефіцієнт природного висвітлення не нижче 1,5 %, штучне висвітлення має бути оснащено системою загального рівномірного висвітлення та давати освітленість на робочому місці 300 лк. Природне освітлення до лабораторії проникає через віконний отвір. Штучне освітлення реалізується за допомогою світильників із люмінесцентними лампами типу ЛБ.

Відповідно до ДСанПІН 3.3.2–007–98 «Державні санітарні правила і норми. Гігієнічні вимоги до організації роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» встановлюються такі внутрішньозмінні режими праці та відпочинку при роботі з ЕОМ: при 8 – годинній денній робочій зміні, залежно від характеру, слід призначати регламентовані перерви для відпочинку тривалістю 15 хвилин через кожен годину роботи.

3.3 Безпека у надзвичайних ситуаціях у приміщенні наукової лабораторії

В університеті за безпеку при НС відповідає штаб цивільної оборони, йому підпорядковуються територіальні штаби цивільної оборони, спеціальні підрозділи міністерств та інших центральних органів державної виконавчої влади, залучені до виконання завдань захисту населення та надання допомоги у НС, та на штатних працівників організації.

На рисунку 3.3 наведено структурну схему штабу цивільної оборони Харківського національного університету радіоелектроніки.

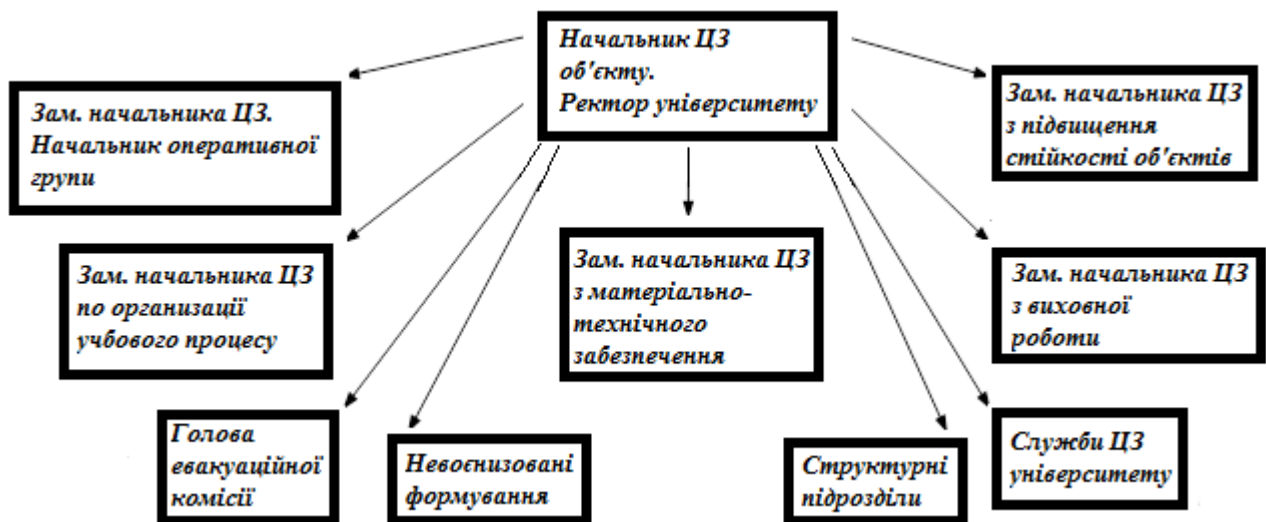


Рисунок 3.3 – Структурна схема штабу цивільного захисту ХНУРЕ

Як правило, в більшості випадків, основною надзвичайною ситуацією в приміщенні наукової лабораторії є загроза виникнення пожежної ситуації.

Науково-дослідна лабораторія розташована в будівлі, виконаній із залізобетонних конструкцій, при роботі тут застосовуються тверді вогнетривкі матеріали. Тому згідно з ДБН В.1.1–7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва» будівля має I ступінь вогнестійкості, виробництво в НДЛ з пожежо-вибухобезпеки відноситься до категорії В, а за НПАОП 40.1–1.21–98 (ДНАОП 0.00–1.21–98) «Правила безпечної експлуатації електроустановок

споживачів» приміщення відноситься до класу П–Па. Вимоги щодо пожежо-вибухобезпеки виконані.

Причиною пожежі в НДЛ може бути коротке замикання електропроводки; несправність ПЕОМ та іншого електрообладнання; нагрівання провідників; куріння в недозволеному місці.

Відповідно до вимог ГОСТ 12.1.004–91 «Система стандартів безпеки праці. Пожежна безпека. Загальні вимоги» та ДБН В.2.5–56:2010 «Інженерне обладнання будинків і споруд. Пожежна автоматика будинків і споруд. Зі зміною № 1», приміщення НДЛ має бути оснащено [18]:

- димовими пожежними сповіщувача у кількості 12 одиниць (з розрахунку 2 сповіщувача на кожні 20 м² площі приміщення);

- вуглекислотними переносними вогнегасниками ємністю не менше 2 л у кількості 5 одиниць (з розрахунку 1 вогнегасник на 20 м² площі, але не менше 2 на приміщення). Тип обраного вогнегасника ВЛК–3,5;

- кошмою.

Необхідно проводити наступні організаційні заходи:

- призначити відповідального за НДЛ за пожежну безпеку;
- включати питання щодо пожежної профілактики у всі інструктажі з техніки безпеки;

- заборонити куріння в недозволеному місці, а також використання в НДЛ нестандартних (саморобних) електроприладів, насамперед нагрівальних, призначити заходи адміністративної відповідальності за порушення цих заборон;

- контролювати ізоляцію та стан електропроводки та електрообладнання.

У приміщенні 12 осіб, тож, згідно з ДБН В.1.1–7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва» та ГОСТ 12.1.004–91 «Система стандартів безпеки праці. Пожежна безпека. Загальні вимоги», евакуацію під час пожежі можна проводити через робочий вихід.

Схему евакуації розмістити на чільному місці біля виходу з приміщення.

Схему евакуації наведено на рисунку 3.2.

ВИСНОВКИ

Розглянуто завдання визначення просторової конфігурації дефекту за виміряним на поверхні об'єкта температурним перепадом, що викликано дефектом. Основна складність розв'язання цієї задачі пов'язана з тим, що внаслідок розтікання тепла, форма кривої температурного перепаду пов'язана з параметрами дефекту складним чином (неоднозначно).

Для подолання зазначеної проблеми, запропоновано використовувати метод моделювання дефекту еквівалентним джерелом тепла, розподіленим за обсягом та поверхні дефекту. У поєднанні з методом теплових передавальних функцій запропонований підхід дозволив отримати тривимірну ТПФ об'єкта з дефектами типу розшарування, що забезпечує визначення конфігурації розшарування за відомою глибиною залягання.

Для дефекту малих розмірів, що моделюється поєднанням точкового та дипольного еквівалентних джерел тепла, показано можливість вирішення задачі теплової дефектометрії щодо його параметрів: розташування центру глибини залягання, ТФГ та об'єму. Розроблено відповідний алгоритм теплової дефектометрії.

Виведено аналітичні співвідношення, що дозволяють оцінити вплив на роздільну здатність теплової дефектометрії таких факторів, як теплофізичні параметри пластини, глибина залягання дефекту, а також максимальний рівень сигналу за інших рівних умов.

Таким чином, отримані теоретичні результати та розроблені методики дозволяють суттєво розширити потенційні можливості теплової дефектометрії (малі дефекти), та підвищити її інформативність (визначення функції $\delta(y, z)$, а не тільки товщини дефекту). Крім того, запропонована модель еквівалентного джерела дозволяє розглядати дефект, як активний елемент, що робить наочнішим процес формування корисного сигналу.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення[Текст]. – Введ.22.06.2015. – К.:ДП«УкрНДНЦ», 2015.– 26 с.
2. Alifanov O.M. Obratnie zadachi teploobmena. M.: Mashinostroenie, 1988. 280 с.
3. Kabanihin S.I. Obratnie i nekorrektnie zadachi. Novosibirsk: Sib. nauch. izd-vo, 2009. 458 с.
4. Beck J.V., Blackwell B., St. Clair C.R. Inverse Heat Conduction. Ill- Posed Problems. New York. J. Wiley and Sons, 1985 // Bek Dzh., Blakuell B., Sent-Kler CH. ml. Nekorrektne obratnie zadachi teploprovodnosti: per. s angl. M.: Mir, 1989. 312 с.
5. Mishra P.C. Simulation of an Inverse Heat Conduction Boundary Estimation Problem Based on State Space Model // International Journal of Engineering and Technology. 2014. Vol. 6, № 1. P. 343 – 349.
6. Babaei A., Mohammadpour A. Solving an inverse heat conduction problem by reduced differential transform method // New Trends in Mathematical Sciences. 2015. Vol. 3, №. 3. P. 65 – 70.
7. Tihonov A.N., Arsenin V.YA. Metodi resheniya nekorrektnih zadach. M.: Nauka, 1979. 286 с.
8. Rapoport E.YA., Pleshivceva YU.E. Specialnie metodi optimizacii v obratnih zadachah teploprovodnosti // Izv. RAN. Energetika. 2002. № 5. С. 144 – 155.
9. Diligenskaya A.N., Rapoport E.Ya. Analytical methods of parametric optimization in inverse heat-conduction problems with internal heat release // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2014. Vol. 87, № 5. P. 1126 – 1134;
10. Korotkii A.I., Mihailova D.O. Vosstanovlenie granichnih upravlenii v parabolicheskikh sistemah // Tr. IMM UrO RAN. 2012. T. 18, № 1. С. 178 – 197.
11. Yaparova N.M. CHislennoe modelirovanie reshenii obratnoi granichnoi

zadachi teploprovodnosti // Vestn. YUURGU. Seriya matematicheskoe modelirovanie i programmirovaniye. 2013. T. 6, № 3. С. 112 – 124.

12. Rapoport E.YA. Strukturnoe modelirovanie obektov i sistem upravleniya s raspredelennimi parametrami. M.: Visshaya shkola, 2003. 299 с.

13. Rapoport E.YA. Alternansnii metod v prikladnih zadachah optimizatsii. M.: Nauka, 2000. 336 с.

14. Методичні вказівки до виконання розділу «Охорона праці» у випускних роботах ОКР «бакалавр» усіх форм навчання [Текст] / Упоряд.: Б.В.Дзюндзюк, В.А.Айвазов, Т.Є.Стиценко. – Харків: ХНУРЕ, 2012. – 28 с.

15. ДСанПН 3.3.2–007–98 «Державні санітарні правила і норми. Гігієнічні вимоги до організації роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин».

16. ГОСТ 12.2.032–78 ССБТ. «Робоче місце під час виконання робіт сидячи. Загальні ергономічні вимоги (2.2.032–78)».

17. ДСН 3.3.6.042–99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень».

18. ГОСТ 12.1.004–91 «Система стандартів безпеки праці. Пожежна безпека. Загальні вимоги».