МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА
НАУКОВО-НАВЧАЛЬНИЙ ІНСТИТУТ
КОМП'ЮТЕРНОЇ ФІЗИКИ ТА ЕНЕРГЕТИКИ

Кафедра інформаційних технологій в фізико-енергетичних системах

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломної роботи
за освітньо-кваліфікаційним рівнем бакалавр

«Виявлення дефектів у композитних матеріалах елементів літаків методом активної термографії»

Виконав: студент 4 курсу, групи НФ-43
Новиков Ф.А.
спеціальність:
105 Прикладна фізика та наноматеріали
освітня програма: Прикладна фізика енергетичних систем
Керівник :
д. ф.-м. н., професор Нємченко К.Е.

Рецензент:

Харків – 2021

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна

Навчально-науковий інститут комп'ютерної фізики та енергетики
Кафедра інформаційних технологій у фізико-енергетичних системах
Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) бакалавр
Спеціальність 105 Прикладна фізика та наноматеріали

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Руслан СУХОВ
підпис
"____"_____2021 року

ЗАВДАННЯ

НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ

Новікова Федора Олександровича

1.Тема роботи «Виявлення дефектів у композитних матеріалах елементів літаків методом активної термографії», керівник роботи: Нємченко К.Е. доктор фізико-математичних наук, професор, затверджені наказом по університету від 29 грудня 2020 року № 0210–05/2127.

2. Строк подання студентом роботи 21.05.2021

3. Перелік питань, які потрібно розробити:

Ознайомитися зі структурою і властивостями композитних матеріалів літальних апаратів. Ознайомитися з типами дефектів в композитних матеріалах літальних апаратів і існуючими методами їх діагностики. Розглянути стандартні теплові моделі і розробити оригінальні з урахуванням структури композитних матеріалів. Розглянути можливості підвищення

ефективності застосування методів активної томографії задля визначення дефектів в композитних матеріалах літаків. Розробити обчислювальні алгоритми для практичного застосування в активній термографії з метою діагностики дефектів в композитних матеріалах літаків.

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Вибір теми.
2	Затвердження теми на кафедрі
3	Робота над літературою та іншими джерелами
4	Написання вступу до роботи та першого розділу
5	Написання другого розділу
6	Написання третього розділу
7	Завершення написання дипломної роботи (висновки та література)
8	Подача науковому керівнику
9	Відгук, рецензія, підготовка до захисту
10	Попередній захист
11	Захист

5. Дата видачі завдання

Студент _____ Федір НОВІКОВ
підпис

Керівник роботи _____ Костянтин НЄМЧЕНКО
підпис

РЕФЕРАТ

Федір Новиков «Виявлення дефектів у композитних матеріалах елементів літаків методом активної термографії»

Кваліфікаційна робота бакалавра з прикладної фізики. - Х. Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, 2020. - 51 с.

У роботі проводиться критичний огляд існуючих методик використання активної термографії для діагностики дефектів композитних матеріалів літаків. Досліджено типи композитних матеріалів, використовуваних в авіаційній індустрії, а також найбільш поширені в них дефекти. Досліджено можливості підвищення ефективності обробки зображень теплових полів поверхні матеріалів літака. Проведено аналіз впливу фізичних властивостей композитних матеріалів на поширення тепла в елементах літаків. Запропоновано методи обробки зображень еволюції теплових полів поверхні композитних матеріалів на основі методів регуляризації.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: АКТИВНА ТЕРМОГРАФІЯ, КОМПОЗИТНІ МАТЕРІАЛИ, ДРОБОВІ ІНТЕГРО-ДИФЕРЕНЦІАЛЬНІ ОПЕРАТОРИ, МЕТОДИ РЕГУЛЯРИЗАЦІЇ.

ABSTRACT

Fedir Novikov «Diagnostics of composite materials of aircraft elements by active thermography»

Qualification work of the bachelor of applied physics. – Kharkiv. – V.N. Karazin Kharkiv national university, 2020. – 51 p.

This paper provides a critical review of existing techniques for using active thermography to diagnose defects in aircraft composite materials. The types of composite materials used in the aviation industry, as well as the most common defects in them, have been investigated. The possibilities of increasing the efficiency of image processing of thermal fields of the surface of aircraft materials are investigated. The analysis of the influence of the physical properties of composite materials on the heat propagation in aircraft elements is carried out. Methods for image processing of the evolution of thermal fields of the surface of composite materials based on regularization methods are proposed.

KEY WORDS: ACTIVE THERMOGRAPHY, COMPOSITE MATERIALS, FRACTIONAL INTEGRO-DIFFERENTIAL OPERATORS, REGULARIZATION METHODS.

РЕФЕРАТ

Фёдор Новиков «Диагностика композитных материалов элементов самолетов методом активной термографии»

Кваліфікаційна робота бакалавра з прикладної фізики. – Х.: Харьковский национальный университет имени В. Н.Каразіна, 2020. – 51 с.

В работе проводится критический обзор существующих методик использования активной термографии для диагностики дефектов композитных материалов самолетов. Исследованы типы композитных материалов, используемых в авиационной индустрии, а также наиболее распространенные в них дефекты. Исследованы методы оптимизации активной термографии композитных материалов. Предложено их использование для повышения качества изображений тепловых полей на поверхности композитных материалов с помощью методов регуляризации с использованием дробных интегро-дифференциальных операторов. В частности, и для уточнения экспериментальных данных эволюции тепловых полей во времени. Рассмотрено влияние фрактальной структуры и памяти в композитных материалпх на распространение. Разработаны вычислительные алгоритмы для применения предложенной модификации анализа данных активной термографии для практического применения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АКТИВНАЯ ТЕРМОГРАФИЯ, КОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ДРОБНЫЕ ИНТЕГРО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ОПЕРАТОРЫ, МЕТОДЫ РЕГУЛЯРИЗАЦИИ,

ЗМІСТ

ВСТУП 8

1. ОГЛЯД ОБЛАСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ І ЕКСПЕРИМЕНТУ 11
   1.1 Матеріали конструкцій літаків та їх пошкодження 11
   1.2 Методи діагностики; тепловий контроль і активна термографія 15
   1.3 Фізичні основи активної термографії 18
   1.4 Апаратура і реалізація методу активної термографії в експерименті 23
   1.5 Постановка основних задач роботи 32

2. ОСОБЛИВОСТІ ПОШИРЕННЯ ТЕПЛОВИХ ІМПУЛЬСІВ В КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛАХ І ВПЛИВ ЕФЕКТІВ ПАМ'ЯТІ НА ЗАЛЕЖНІСТЬ ТМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ ВІД ЧАСУ 33
   2.1 Методи регуляризації рішення некоректних задач діагностики в композитних матеріалах 36
   2.2 Ефект пам'яті в композитних матеріалах 35
   2.3 Закон збереження енергії і різні форми рівняння переносу енергії
   2.4 Динамічні властивості температурних полів в композитних матеріалах з дефектами 39

3. АЛГОРИТМІЧНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОБРОБКИ ДАНИХ АКТИВНОЇ Т
   3.1 Методи усереднення і регуляризації для обробки часових рядів зображень поверхні композитних матеріалів 42
   3.2 Визначення параметрів дефектів по зображенням поверхні композитних матеріалів 46

ВСТУП

Завдяки своїм унікальним властивостям, а саме міцності, невеликій вазі, стійкості до корозії і втоми та іншим, композитні матеріали (КМ) мають застосування майже в кожній галузі промисловості, зокрема, в виробництві сучасних пасажирських і військових літаків. Поєднання легкості та міцності в КМ забезпечує необхідні практично для кожного сучасного літака властивості і при цьому зніжує його вартість.

Однак, не зважаючи на всі позитивні властивості КМ, їм притаманні специфічні дефекти, які утворюються як при виробництві, так і при експлуатації. Що характерно, знайти дефекти в КМ візуально майже неможливо, оскільки вони знаходяться всередині деталі, але їх наявність може привести до суттєвого послаблення конструкції, і як наслідок, стати причиною катастрофи. Саме для виявлення дефектів і запобігання катастроф, до яких вони призводять, була створена велика кількість методик неруйнівного контролю, а саме: радіаційний, вихрострумовий, акустичний і багато інших, але через фізичні характеристики КМ, найбільш дієвим є тепловий, що підтверджує його використовування провідними авіаційними компаніями.

Слід зазначити, що всі комерційні закордонні технології теплового контролю якості в авіації є секретами виробництва відповідних компаній та зроблені задля власних композитних матеріалів власних літаків. Попри те, що метод теплового контролю широко використовуються в авіаційній галузі за кордоном, в Україні він не знайшов застосування. Саме тому розвиток та вдосконалення відповідних технологій має велику важливість та актуальність для української авіаційної промисловості.

Дана дипломна створювалася як продовження роботи [1], яка була виконана у співпраці з Харківським державним авіаційним виробничим підприємством (ХДАВП). В роботі [1] були наведені результати

експериментальних досліджень теплових процесів на поверхні зразків з композитних матеріалів, проведених з метою розробки методики оптимального виявлення внутрішніх дефектів і визначення їх параметрів. Ці дослідження були етапом роботи зі створення вітчизняної технології ТК (апаратури і методики) в рамках науково-технічного інноваційного проекту НАН України «Створення інфрачервоного діагностичного комплексу і методики виявлення дефектів в композитних матеріалах елементів літаків і їх обладнання ».

Актуальність теми.

Розроблення нових методів діагностики елементів літаків для ХГАПП є актуальною і прикладною проблемою, розв’язання якої здатне значно підвищити якість і ефективність процесу виробництва літаків.

Об’єкт дослідження.

Дефекти в елементах літаків.

Предмет дослідження.

Розповсюдження тепла в КМ та аналіз теплових полів на їх поверхні.

Методи дослідження.

Рівняння теплопровідності з граничними умовами відповідними до структури зразків КМ, алгоритми обробки зображень

Наукова новизна одержаних результатів.

Були вперше застосовані алгоритми обробки зображень на основі методів регуляризації задля аналізу при використанні методу теплового контролю та виконано критичний аналіз термограм, одержаних на вітчизняному і

доступному для широкого використання тепловізорі. Було розглянуто гіперболічне рівняння теплопровідності з використанням дробових похідних.

Практичне значення отриманих результатів:

Новий метод діагностики композитних матеріалів здатен підвищити точність виявлення дефектів і, як наслідок, продовжити час експлуатації літаків та зменшити ймовірність катастрофи.

Структура і обсяг роботи.

Кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 51 сторінку, із них основного тексту 49 сторінок, 18 рисунків за текстом, список використаних джерел із 23 найменування на 2 сторінках.

1. ОГЛЯД ОБЛАСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ І ЕКСПЕРИМЕНТУ

1.1. Матеріали конструкцій літаків та їх пошкодження

Використання армованих волокнами КМ стає все більш привабливою альтернативою звичайним матеріалам для багатьох компонентів літальних апаратів (Рис.1.1), головним чином завдяки їхній підвищеній міцності, довговічності, стійкості до корозії, стійкість до втоми та високої стійкості до пошкоджень.



Рис.1.1. Використовування матеріалів в авіаційній промисловості 1985-2014 [4]

Композити також забезпечують більшу універсальність, оскільки вони можуть бути адаптовані до відповідних вимог спеціальної деталі літального апарату. Індивідуально розроблені окремі композитні деталі приблизно на 20-30% легші за звичайні металеві аналоги. І не зважаючи на те, що літаки цілком зроблені з КМ на даний час доступні на світовому ринку, зазвичай складова КМ становить 50-70% від ваги всієї конструкції.

Композитні матеріали, що використовуються в авіаційній промисловості, як правило складаються з волокон або ниток, вбудованих в смоляну матрицю. Найпоширеніші волокна - це вуглець, арамід, скло та їх поєднання.

Композитні компоненти літальних апаратів, що використовуються для зовнішнього застосування, зазвичай виготовляються з тришарової конструкції, що має лицьові листи з вуглепластику або вуглепластику в поєднанні з арамідом або скляними волокнами з стільниковою серцевиною, що необхідно враховувати при діагностиці дефектів. Стільникова структура серцевині робить неможливим проведення контролю якості внутрішнього шару фюзеляжу при використанні одностороннього ТК. Загальні вимоги до сертифікації застосовуються як до КМ, так і до металу в конструкції літального апарату, однак існують варіації, які пов'язані із внутрішніми відмінностями між структурною поведінкою металів та КМ. І хоча вимоги до конструкції застосовуються як до металевих, так і до композитних елементів літаків, сертифікація КМ є більш масштабною і вимагає набагато більше тестів. Виробник повинен виготовити та випробувати тисячі зразків та сотні підкомпонентів, щоб кваліфікувати одну нову вуглепластикову систему та супутні структурні деталі (см. Таблицю (1.1)) [7].

Ці дефекти здебільшого обумовлені розшаруванням, розклеюванням, тепловим впливом, пошкодження стільникового наповнення та пошкодження в результаті експлуатації, такі як потрапляння птахів, пошкодження від зовнішніх предметів тощо.

Таблиця 1.1

Найбільш поширені типи пошкоджень в КМ літальних апаратів, які можна діагностувати за допомогою теплового контролю

Матеріали	Застосування	Дефекти
Композитні ламінати (вуглепластик, склопластик) і гібридні КМ	Первинні і вторинні елементи літального апарату	Розшарування
		Пошкодження від ударів і малі пошкодження
		Внутреламінатний розрив
		Пористість
		Розтріскування волокна або матриці
	Лопатки турбіни двигуна	Тріщини від термічного навантаження
		Розшарування між керамічним термічним бар'єрним покриттям і КМ
	Стільникові панелі	Відклеювання зовнішнього шару від внутрішнього
		Розшарування зовнішнього слою
		Пошкодження стінки стільника
		Відсутність клею
		Потрапляння води
		Руйнування серцевини стільника

Типові пошкодження зображено на рис. 1.2-1.4 [7]:

- пошкодження КМ зображено на рис. 1.2,
- пошкодження лопаток турбіни двигуна зображено на рис. 1.3 [7],
- пошкодження стільникової панелі на рис 1.4 [7].

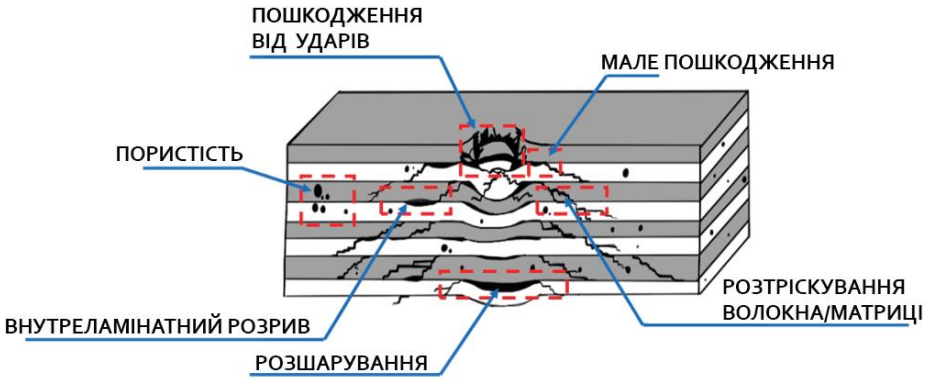


Рис 1.2. Типове пошкодження КМ.

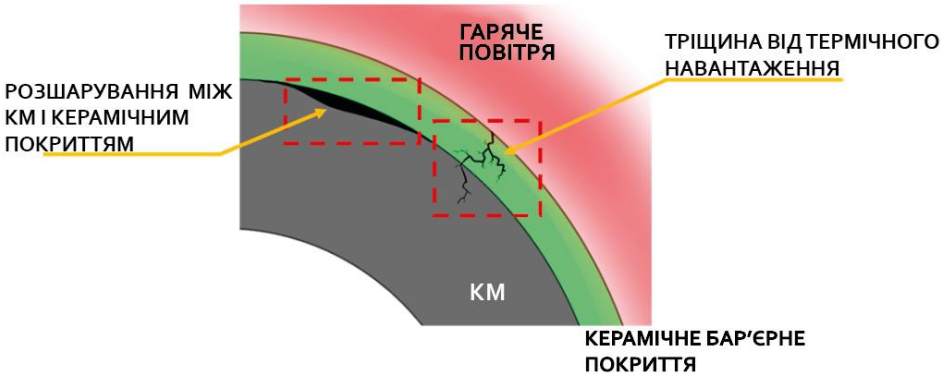


Рис. 1.3. типове пошкодження лопаток турбіни двигуна

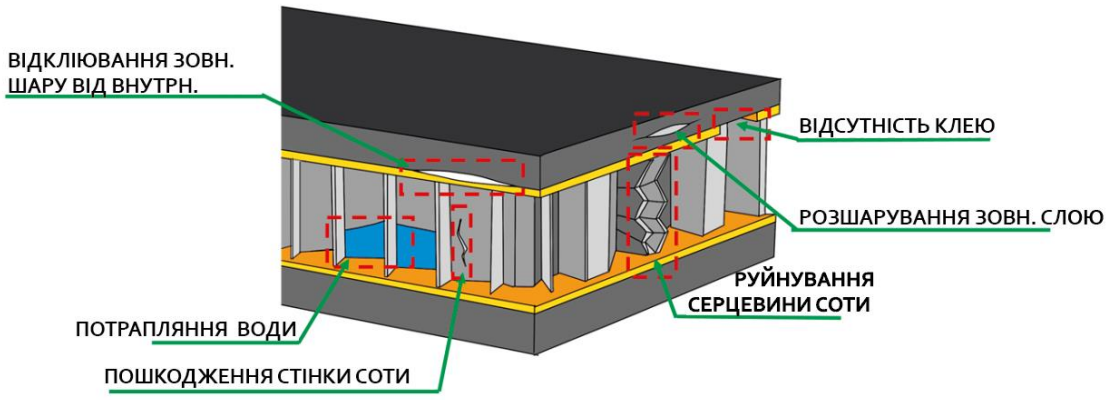


Рис.1.4. типове пошкодження стільникової панелі

1.2. Методи діагностики; тепловий контроль і активна термографія

Контроль якості (або діагностика дефектів) може бути визначений як процес аналізу фізичного стану параметрів пов'язаних зі структурою з метою визначення цілісності структури [5]. Контроль якості передбачає прогнозування пошкоджень в конструкції під впливом навантажень та умов навколишнього середовища. Варто зазначити, що розпочата тріщина або пошкодження не означає остаточне руйнування конструкції. Але щоб зберегти функціонування літаків в оптимальному стані контроль якості використовують на функціонуючих і зовні неушкоджених структурних компонентах, оскільки будь-який не виявлений вчасно знос, часто переростає в більш серйозні пошкодження, що впивають на сусідні частин конструкції.

Неруйнівний контроль якості або просто неруйнівний контроль (НК) є методом виявлення внутрішніх дефектів в матеріалах, не пошкоджуючи їх [6]. НК також можна визначити як сукупність неінвазивних методів визначення цілісності матеріалу, компонентів структури і методів кількісного вимірювання деяких характеристик об’єкта. НК це дуже широке міждисциплінарне поле, яке відіграє важливу роль в аналізі властивостей та параметрів будь-якого матеріалу. До НК можна віднести такі переваги: аналіз деталей проводиться без їх пошкодження, економія коштів, підвищення якості виробництва, економія часу при інспекції виробу, інспекція може проводитися на етапі виготовлення і на етапі експлуатації, можуть бути виявлені як поверхневі, так і внутрішні дефекти .

Методи НК можна класифікувати багатьма способами, такими як: звичайні і передові методи, пасивні і активні техніки або контактні та безконтактні методи тощо. Звичайні методи - це методи НК, які добре зарекомендували себе і повністю розвинулися за останні десятиліття. Передові

методи, навпаки, використовуються дуже обмежено, оскільки вони, як правило, менш досліджені і менш універсальні. В пасивному НК, наприклад при акустичній емісії, досліджуються різні матеріали і структури за допомогою використання їх внутрішньої енергії відповідними фізичним полями, тоді як у випадку активного НК джерело стимуляції зовнішнє (вимушене фізичне поле таке як тепло, сила, холодне повітря тощо). Контактний тип НК зазвичай використовується в будівельній промисловості, де, наприклад, датчики безпосередньо прикріплені до випробовуваних матеріалів і конструкцій. У безконтактних методах дані збираються без прямого контакту з поверхнею випробовуваної конструкції, наприклад, у тепловому контролі.

Тепловий контроль (ТК) (або інфрачервона термографія) є відносно новою технологією у світі НК. ТК це процес спостереження температурних полів, що знаходяться в інфрачервоній частині електромагнітного спектра. Існує два типи термографічних методів контролю КМ: пасивний і активний. При пасивному ТК об'єкт випробувань характеризується температурним полем, сформованим в процесі його функціонування, в той час як активний метод передбачає використання додаткового джерела теплової стимуляції (навантаження) об'єкта.

Пасивний ТК зазвичай використовується для матеріалів, які не перебувають у тепловій рівновазі і мають іншу від навколишнього середовища температуру. Пасивний ТК підходить для циклічного навантаження, оскільки одержуване гістерезисне тепло забезпечує залежні від часу коливання температури, які можна реєструвати за допомогою інфрачервоної камери. Наприклад, пасивний ТК може бути використаний для виявлення води, що потрапила під обшивку літака, оскільки відразу після посадки виникає значна різниця температур між обшивкою і водою.

Активний ТК, навпаки, використовує джерела зовнішнього збудження, такі як оптичне випромінювання (наприклад, галогенні теплові лампи та лазер),

електромагнітна стимуляція (індукційні вихрові струми та мікрохвилі), механічні ультразвукові хвилі і інші для отримання тепла в компонентах, які досліджуються.

Оптичний ТК (використаний в статті [1]) можна класифікувати в залежності від типу зовнішнього оптичного джерела тепла, що використовується для генерації теплових хвиль. Найбільш поширені методи, що використовуються в оптично стимульованій термографії зображені на рис. 1.5.

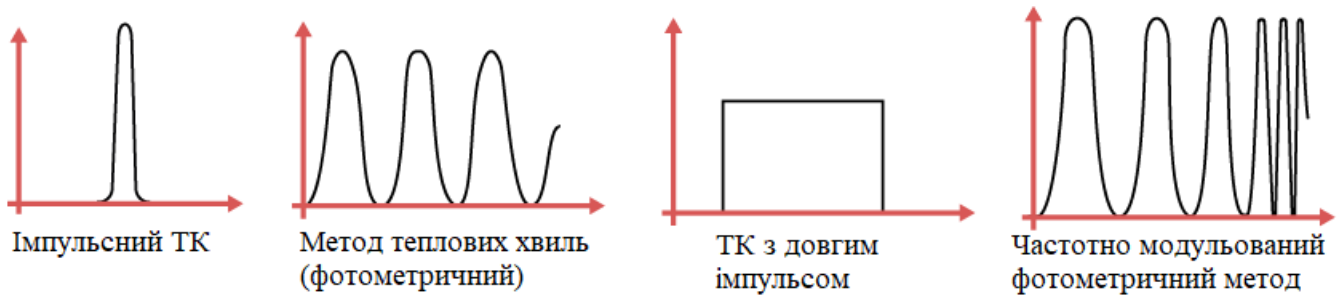


Рис. 1.5. найбільш поширені методи оптично стимульованого ТК

При активному ТК температурні градієнти на поверхні середовища реєструються та аналізуються ІЧ-камерою для отримання інформації про цілісність структури. Коли теплові хвилі поширюються всередині зразка шляхом дифузії, швидкість дифузії тепла в дефекті відрізнятиметься від швидкості в навколишній території, в результаті виникає термічний сигнал, який використовується для виявлення та кількісної оцінки пошкоджень.

В силу своїх властивостей, використання активного ТК не потребує складного обладнання, і як продемонстровано в статті [1], для виявлення більшості дефектів достатньо використовувати електричний нагрівач у вигляді плоскої спіралі, забезпечений рефлектором і механічним переривником

теплового потоку. З цієї причини активний ТК має відносно низьку ціну в порівнянні з більш складним обладнанням НК, наприклад, таким як ультразвукова фразована решітка та рентгенівська система (комп'ютерна томографія).

1.3. Фізичні основи активної термографії

При використанні термографії ключову роль в виявлені дефектів відіграють механізми теплообміну складових КМ а також дефектів, які в них утворюються, тому виникає необхідність у їх розгляді.

Одним з найбільш поширених типів дефектів є розшарування в КМ, при якому в середину матеріалу потрапляє газ (зазвичай повітря). Згідно до кінетичної теорії речовини перенесення тепла теплопровідністю в газах при звичайних тисках і температурах визначається переносом кінетичної енергії молекулярного руху в результаті хаотичного руху і зіткнення окремих молекул газу. При цьому коефіцієнт теплопровідності визначається співвідношенням

$$\lambda = \frac{1}{3}\bar{v}\bar{l}c_v\rho$$

, де $\bar{v}$ - середня швидкість руху молекул газу; $\bar{l}$ - середня довжина вільного пробігу молекул газу між їх зіткненнями; c_v - теплоємність газу при постійному об'ємі; ρ - густина газу. Зі збільшенням тиску рівною мірою збільшується ρ і зменшується $\bar{l}$, а добуток $\bar{l}\rho$ зберігається постійним. Тому коефіцієнт теплопровідності мало змінюється в залежності від тиску. виняток становлять дуже малі (менше 2,67 кПа.) і дуже великі (понад 200 МПа) тиски. Теплоємність газів зростає з підвищенням температури, що пояснюється фактом зростання коефіцієнту теплопровідності для газів з підвищенням температури.

Механізм поширення тепла в крапельних рідинах можна описати як перенесення енергії шляхом пружних коливань. Деякі дефекти в елементах

літаків (див рис. 1.4) пов’язані з потраплянням води в стільникову структуру фюзеляжу, тому в рамках роботи буде достатньо привести її теплоємність: $\lambda = 0.6 \frac{\text{Вт}}{\text{м·К}}$ і теплоємність $c = 4183 \frac{\text{Дж}}{\text{кг·К}}$ за температури 20°С. Значення для інших температур можна знайти в відповідних таблицях.

КМ іноді армуються сітчастою металевою структурою, яка дає найбільший внесок в теплофізичні властивості. В металах основним провідником тепла є вільні електрони, які можна вважати ідеальним одноатомним газом. передача тепла за допомогою коливальних рухів атомів або у вигляді пружних звукових хвиль не виключається, але її складова незначна в порівнянні з переносом енергії електронним газом. Внаслідок руху вільних електронів відбувається вирівнювання температури у всіх точках металу. Вільні електрони рухаються як з областей, більш нагрітих, в області, менш нагріті, так і в зворотному напрямку. У першому випадку вони віддають енергію атомам, у другому відбирають. Оскільки в металах носіями теплової та електричної енергії є електрони, то коефіцієнти теплопровідності і електропровідності пропорційні один одному. При підвищенні температури, внаслідок посилення коливального руху атомів, розсіювання електронів на них збільшується. Це спричиняє зменшення коефіцієнтів тепло- і електропровідності чистих металів. При наявності різного роду домішок коефіцієнт теплопровідності металів значно зменшується. Це можна пояснити збільшенням структурних неоднорідностей, які призводять до розсіювання електронів. У відмінності від чистих металів коефіцієнти теплопровідності сплавів при підвищенні температури збільшуються, що необхідно враховувати при розгляді моделі теплопровідності КМ.

Основа матриці в КМ складається з діелектричного аморфного матеріалу, зазвичай, епоксидної смоли або її аналогів. У діелектриках і аморфних тілах з підвищенням температури коефіцієнт теплопровідності зазвичай збільшується. Як правило, для матеріалів з більшою густиною коефіцієнт теплопровідності

має більш високе значення. Спричинено це тим, що для малої температури середня довжина вільного пробігу обмежена розмірами структурних елементів (порядку десятків нанометрів), тому за високих температур теплопровідність змінюється так само, як і теплоємність - збільшується зі збільшенням температури.

Результатом різних теплофізичних характеристик дефектних і бездефектних зон стає неоднорідне розповсюдження теплових хвиль в матеріалах, і як наслідок, неоднорідні теплові поля на поверхнях матеріалів. В аналізі цих полів і полягає головна мета ТК.

Ключовим поняттям ТК є диференційний температурний сигнал, який визначається як різниця температур в досліджуваній точці і зоні прийнятій за бездефектну: $\Delta T(x, y, z) = T_д(x, y, z) - T_{бд}(x, y, z)$. Саме використання диференційного температурного сигналу надає можливість виявляти дефекти.

При використанні активної термографії зазвичай реалізується метод одностороннього ТК (контроль, за якого регістрація теплового зображення проходить лише з одної сторони), оскільки в промислових реаліях повноцінно провести ТК з середини літака майже неможливо. Використана в експерименті [1] схема розташування засобів і об'єктів контролю зображає типову для багатьох випадків конфігурацію рис. (1.5).

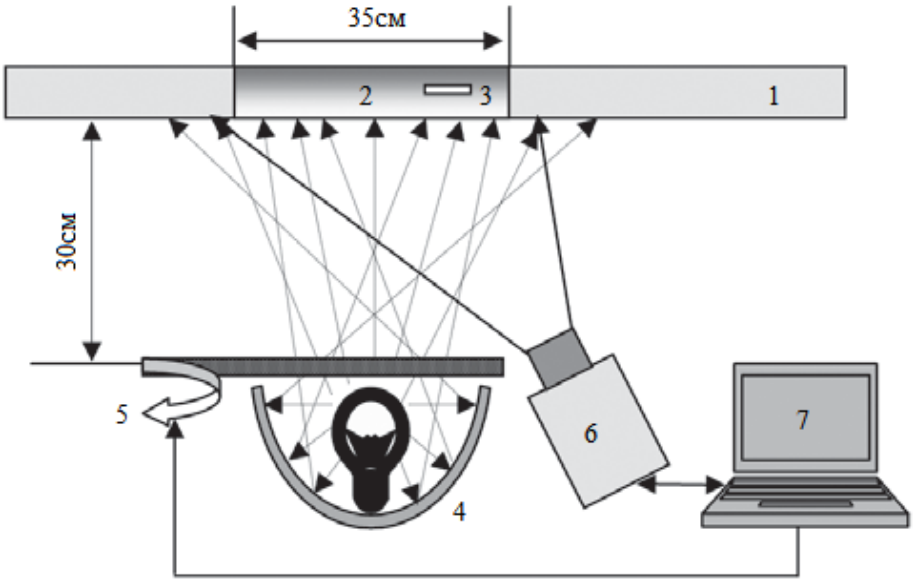


Рис. 1.5: Схема розташування засобів і об'єктів контролю. 1 - Контрольний зразок, 2 - обстежувана ділянка поверхні 35 × 35 см^2 , 3 - внутрішній дефект, 4 - джерело інфрачервоного випромінювання з рефлектором, 5 - переривник теплового потоку (заслінка), 6 - термограф, 7 – ПК

В ході експерименту [1] проводилося нагрівання об'єкта одиничним тепловим імпульсом кінцевої тривалості t_{imp}., який з достатньою точністю можна вважати дельта-імпульсом. Схематичне зображення типових часових залежностей температур поверхні над дефектною і без дефектною ділянками рис. (1.6) [1] с.

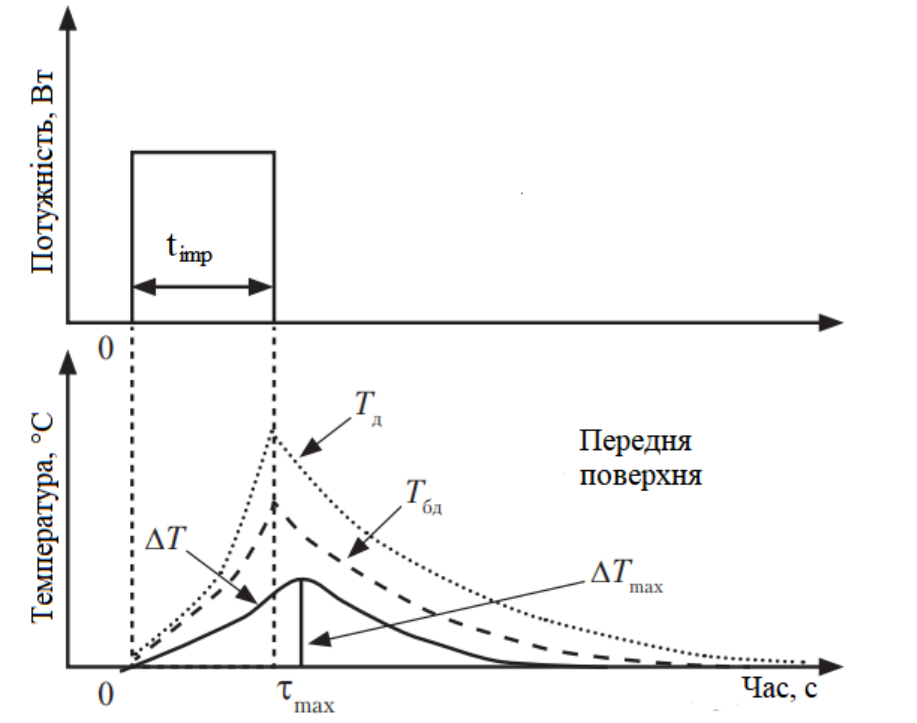


Рис. 1.6: Зміна температури поверхні зразка над дефектною і бездефектної областями за одностороннього ТК

Треба зазначити, що на рис. 1.2 зображено лінійне наближення функції потужності від температури, в реальному ж випадку потужність не одразу зростає до максимального значення і не одразу спадає, але відносно довгий час

нагріву (1с - 4.5с) [1] надає можливість використовувати лінійне наближення з великою точністю.

Під час нагрівання надлишкова температура на передній поверхні об'єкта зростає і досягає максимального значення в момент часу t_{imp}, відповідній до закінчення теплового імпульсу. На стадії охолодження поверхні в процесі поширення теплової хвилі вглиб зразка і теплового обміну з навколишнім середовищем відбувається спад надлишкової температури до нульового значення. Відмінності теплофізичних властивостей матеріалу в дефектної і бездефектної областях призводять до неоднакових умов поширення теплової хвилі, внаслідок чого виникають надлишкові температури на поверхні над цими областями, які змінюються протягом часу. Таким чином виникає диференційний температурний сигнал. Залежність від часу температурного сигналу має максимум ΔT_{max}, який досягається в певний момент часу τ_{max} - оптимальний час спостереження дефекта див. рис. 1.6. Обидва параметра, ΔT_{max} і τ_{max}, залежать від глибини залягання і геометричних розмірів дефекту, теплофізичних характеристик матеріалів досліджуваного об'єкта і дефекту, вони є основними інформативними параметрами амплітудного методу ТК. Найточніша формула запропонована авторами роботи [1] може бути використана, якщо тривалість імпульсу одного порядку, але менша за оптимальний час спостереження $\tau_{max} > t_{imp}$ (див. мал. 1.6).

$$l^2 = a(\tau_{max} - t_{imp}) \qquad (1.1)$$

Де τ_{max} - оптимальний час спостереження дефекту, t_{imp} - час імпульсу, l - глибина залягання дефекту, $a = \lambda/c\rho$ - коефіцієнт температуропровідності матеріалу, λ - коефіцієнт теплопровідності, c - теплоємність, ρ - густина. При цьому паспортні значення коефіцієнту температуропровідності вуглепластикових і склопластикових зразків використаних в експерименті в поперечному напрямку шарів становили $a = 4{,}7 \cdot 10^{-7} м^2/с$ і $a = 1{,}4 \cdot 10^{-7} м^2/с$ відповідно. Але, як виявляється з експерименту, її точності не

достатньо для кількісного знаходження глибини залягання дефектів, отже виникає потреба в альтернативних методах.

1.4. Апаратура і реалізація методу активної термографії в експерименті

В ході експерименту було проведено дослідження динаміки надлишкових теплових полів на поверхнях всіх контрольних зразків при різній потужності та тривалості теплових імпульсів. Перед початком теплового імпульсу була записана фонова термограма, яка використовувалася при подальшій обробці термографічного фільму для врахування зовнішніх пошкоджень поверхні, відображень і т.д. Синхронно з початком імпульсу здійснювався автоматичний запис (кожні півтори секунди) послідовність з 30-100 термограм поверхні для подальшого аналізу.

В експерименті були досліджені наступні зразки: монолітний чотириступеневий вуглепластиковий зразок із зовнішнім органопластиковим покриттям і з десятьма еталонними дефектами на різній глибині; а також чотириступеневий монолітний склопластиковий зразок з шістьма еталонними дефектами. На рис. 1.3 зображено зовнішній вигляд вуглепластикового зразка з зазначеними положеннями дефектів і зворотна сторона зразка, покрита органопластиком (а, б), термограма зразка через 4 с після закінчення теплового імпульсу тривалістю 2 с (в), і сумарна термограма 50-ти кадрів (г).

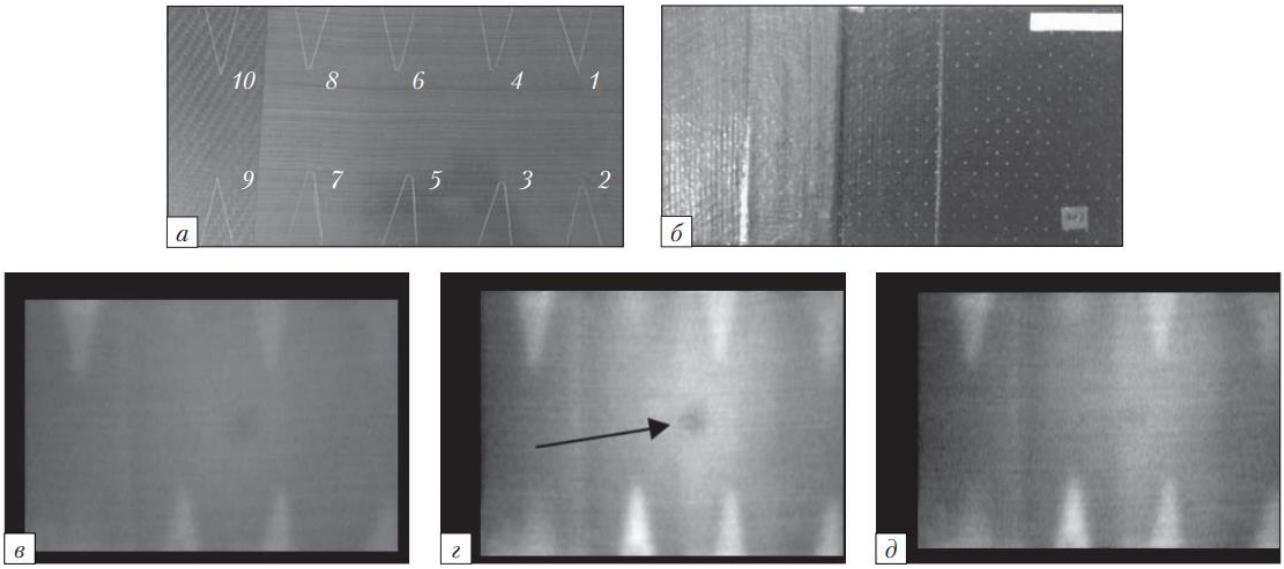


Рис. 1.3.[1] Приклад виявлення дефектів в монолітному чотириступінчастому вуглепластиковому зразку: а - зовнішній вигляд зразка з позначеними положеннями десяти дефектів; б - зворотна сторона зразка, покрита органопластиком; в - термограма фрагмента зразка через 4 с після закінчення теплового імпульсу; г - сумарна термограма після складання 50-ти послідовних термограм фільму; д - сумарна термограма зі зниженою нерівномірністю теплового імпульсу і помилковими відображеннями.

Видно, що підсумовування всієї послідовності термограм не тільки збільшує співвідношення сигнал / шум, а ще й знижує рівень шумів в $\sqrt{N}$ раз, де N - число термограм. Також сума термограм містить теплові відбитки всіх дефектів, що залягають на різній глибині. проста операція віднімання з сумарної термограми першої термограми фільму, записаної в момент припинення теплового імпульсу, (рис. 1.3, д) дозволяє зменшити нерівномірність теплового поля, викликану неоднорідністю теплового імпульсу і уявного відображенням.

Наприклад, на термограмі (рис. 1.3, д) відсутня гіпотермічна пляма, яка є відображенням на поверхні зразка холодного вікна кріостату (вказано чорною стрілкою), а також радіальна нерівномірність теплового поля.

Для визначення глибини залягання кожного дефекту були проаналізовані часові залежності температур поверхні в проекції дефекту і опорної (бездефектної) області. Для зменшення похибки вимірювань розглядалися зміни середніх температур ділянок однакової площі над дефектною і бездефектною областями.

На рис. 1.4 зображені часові залежності температури на поверхні елемента товщиною 3,8 мм в проекції дефекту № 5 (глибина залягання 1,25 мм) і температури над бездефектною областю в цьому ж елементі. Тривалість імпульсу 1 с. Ділянки 6 × 6 пікселів, в яких вимірювалася середня температура $T_д$ і $T_{бд}$, показані на термограмі дефекту (вставка).

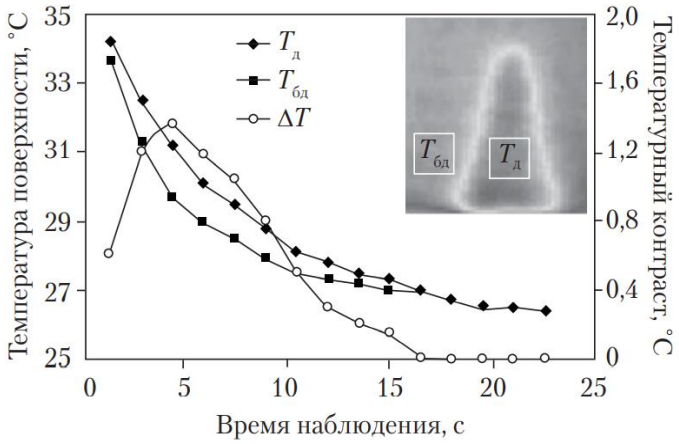


Рис. 1.4. [1] Динаміка середньої температури ділянок поверхні вуглепластикового зразка над дефектною і бездефектною областями і відповідна часова залежність теплового контрасту дефекту. На вставці - теплове зображення дефекту з зазначеними ділянки ми, в яких вимірювалася середня температура над дефектної і бездефектної областями.

За часової залежності температурного контрасту Tвидно, що максимальне проявлення дефекту спостерігається в момент часу $\tau_{max} = 4{,}5$ с , що з достатньої точність збігається зі значенням, оціненим за виразом (2): $(\tau_{max})_{\text{розрах}} = 4{,}7$ с при паспортному значенні температуропроводности зразка $\text{а} = 4{,}2 \cdot 10^{-7} \text{м}^2/\text{с}$.

На рис. (1.5), а наведені виміряні часові залежності температурних контрастів дефектів №№ 2, 3, 4, 7 і 8 (див. рис. 3, а), які перебувають відповідно на глибинах 1,1, 1,5, 2, 2,3 і 4,3 мм в двох ділянках зразка приблизно однакової товщини (5,5 і 6 мм). Тривалість імпульсу нагрівання - 1,5 с.

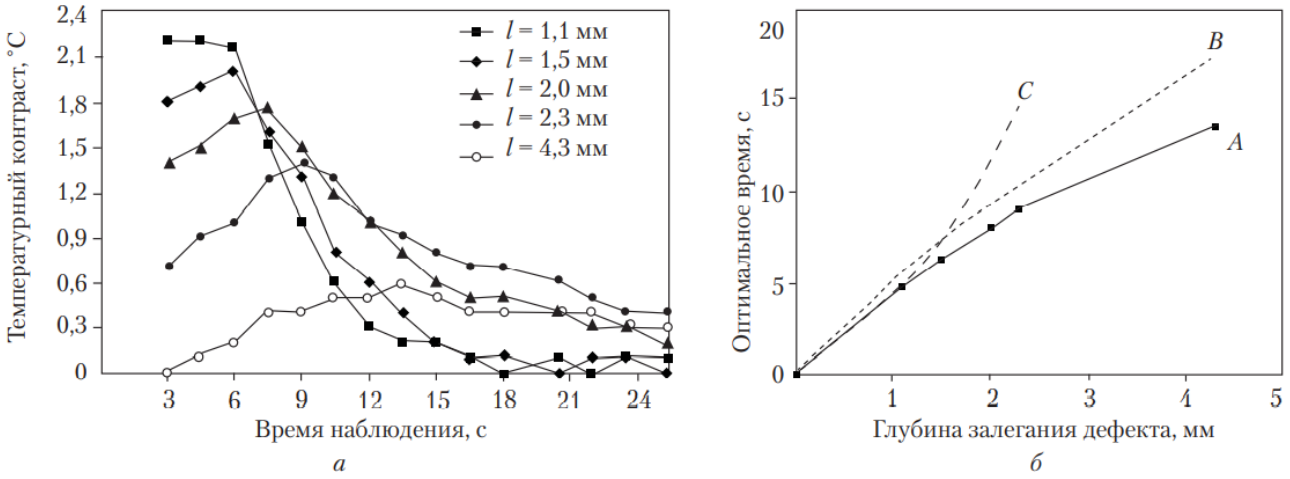


Рис. 1.5.[1] Приклад залежності інформативних параметрів від глибини залягання дефектів: а - динаміка температурних контрастів для дефектів з різною глибиною залягання в вуглепластиковому зразку; б - залежність оптимального моменту спостереження від глибини залягання дефекту: А - експериментальні дані, В - розрахунок по «індивідуальній» функції інверсії [2], С - розрахунок за виразом (1.1).

На рис. (1.5), б зображено експериментальну залежність оптимального часу спостерігання дефектів від їх глибини залягання (А), залежність, отриману за формулою «індивідуальної» функції інверсії:

$$l[\text{мм}] = -0{,}005 + 0{,}177\tau_{max} + 0{,}424(\tau_{max})^2 ,$$

Запропонованої авторами роботи [2], задля відновлення параметрів повітряних розшарувань в аналогічному вуглепластиковому зразку товщиною 5 мм (В), і залежність, побудовану відповідно до оціночної формули (2) (С). Видно, що характер поведінки залежностей А і В аналогічні. Отримані експериментальні дані (А) описуються поліномом:

$$l[\text{мм}] = -0{,}0286 + 0{,}1585\tau_{max} + 0{,}0115(\tau_{max})^2$$

Розбіжності експериментальних залежностей А і В обумовлені відмінностями теплофізичних характеристик зразків. З іншого боку, оціночна залежність С різко розходиться з експериментальною кривою А вже для глибин більше 1,5 мм.

На рис. (1.6), а зображена термограма чотирьохступеневого монолітного склопластикового зразка з шістьма еталонними дефектами, стимульованого тепловим імпульсом тривалістю 2 с, отримана в результаті підсумовування всіх кадрів фільму (цифрами відзначені номера дефектів). На рис. 1.6, б зображена термограма фрагмента зразка в момент часу максимального контрасту дефекту № 3, розташованого на глибині 0,8 мм в ділянці товщиною 2,5 мм.

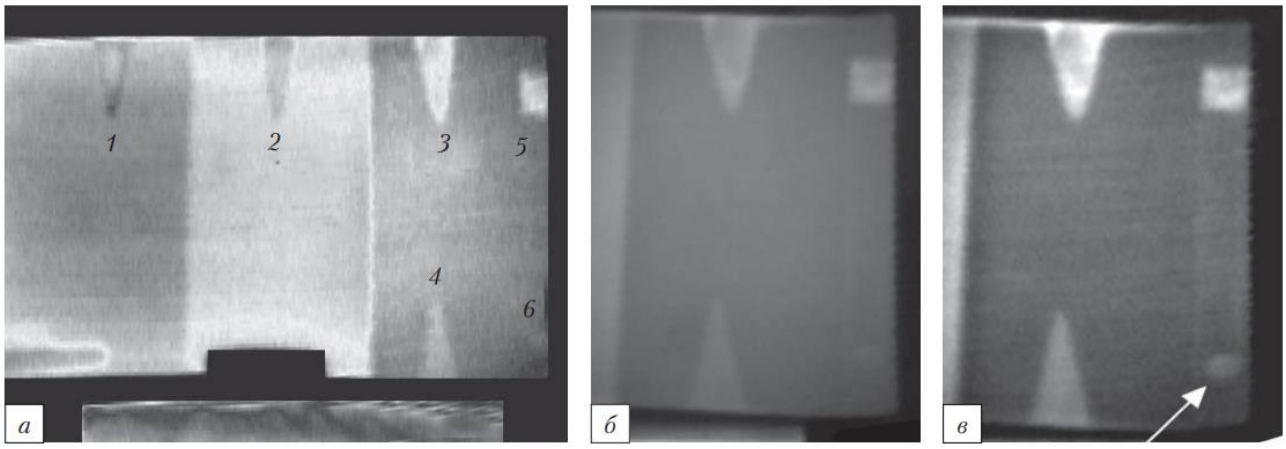


Рис. 1.6. [1] Термограми чотириступінчастого монолітного склопластикового зразка з шістьма дефектами: а - сумарна термограма всього зразка; б - термограма фрагмента зразка в оптимальний момент прояву дефекту№ 3; в - сумарна термограма фрагмента зразка після віднімання першої термограми фільму (біла стрілка вказує на тепловий відбиток кріплення)

Глибина розташування дефекту № 3, оцінена відповідно до (1.1) по експериментально отриманому оптимальному моменту спостерігання цього дефекту $\tau_{max} = 4{,}5$ с, склала $l_{\text{розрах}} = 0{,}7$ мм, що збігається з паспортним

значенням глибини цього дефекту. На рис. 1.6,в зображен фрагмент результуючої термограми після додавання всіх термограмм даного фільму з віднятою першою термограмою послідовності. На термограмі (рис. 1.6, в) стрілка вказує на теплової відбиток еталонного дефекту № 6 - виїмки матеріалу (кріплення) із зворотного боку виробу діаметром D = 10 мм, відступаючої на 1 мм від досліджуваної поверхні ділянки товщиною 2,8 мм.

На рис. 1.7 наведені часові залежності теплового контрасту кріплення, отримані при трьох різних положеннях опорної зони, обраної на рівних відстанях від дефекту.

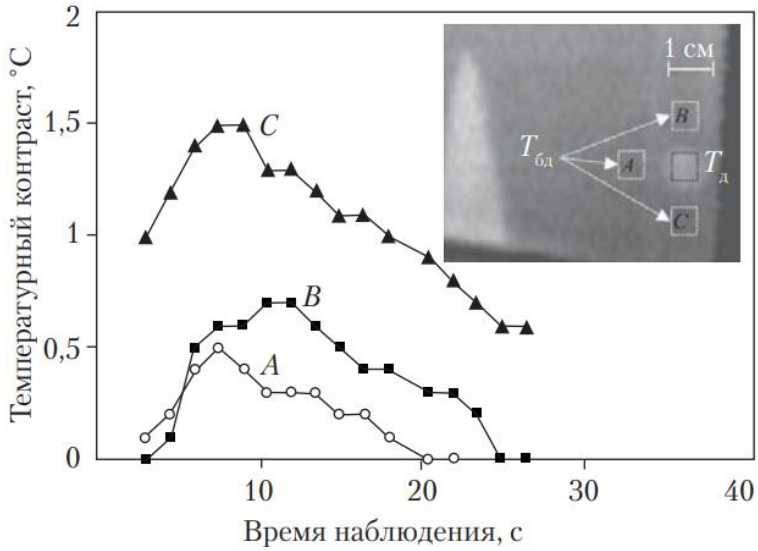


Рис. 1.7. [1] часова залежність температурного контрасту кріплення, розташованого на краю монолітного склопластикового зразка. На вставці - термограма фрагмента зразка з зазначеними ділянками для контролю динаміки їх середньої температури. Похибка вимірювань визначалася чутливістю тепловізора:

$$\delta = \pm 0{,}1\ ^\circ\mathrm{C}$$

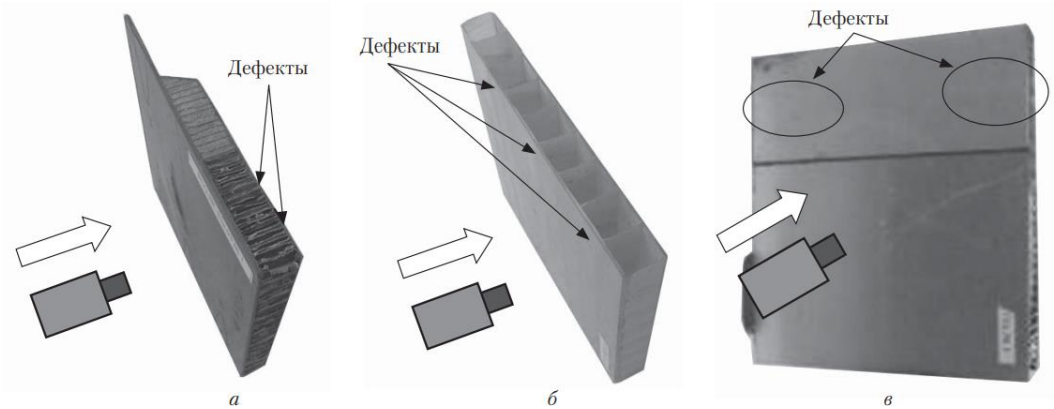
Виміряна для даного дефекту часова залежність теплового контрасту (рис. 1.7, крива В) дає час оптимального спостереження τ_{max} - 12 с. Для визначення характеристик такого виду була запропонована модель «теплової пастки», згідно з якою τ_{max} інтерпретується як час, необхідний для заповнення

падаючим теплом циліндра з основою і висотою, рівними площі дефекту і глибині його залягання. Оцінена відповідно до цієї моделі глибина залягання даного дефекту становила $l_{розрах} = a \cdot \tau_{\max} / \left(\pi D \sqrt{2} \right) = 0.035$ мм, що значно відрізняється від паспортного значення $l = 1$ мм. Оцінка відповідно до виразу (2) дає більшу точність: $l_{розрах} = \left[a \left(\tau_{\max} - \tau_{імр} \right) \right]^{1/2} = 1.14$ мм

Слід зазначити, що значення вимірюваної τ_{max}, і, отже, визначених за цим параметром глибин залягання дефектів, залежали від положення опорної (бездефектної) області щодо дефектної області і від близькості країв зразка.

Положення опорних областей А, В і С вказані на вставці рис. 1.7. Видно, що положення опорної зони впливає як на амплітуду контрасту, так і на час його максимуму. При цьому τ_{max} змінюється на кілька секунд. Відповідно, будуть відрізнятися і отримані значення глибини розташування дефекту. Очевидно, це пов'язано з неоднорідністю поздовжньої дифузії тепла через різні умови тепловідводу при кінцевих розмірах зразків.

В результаті експериментальних досліджень теплових процесів на поверхні 20-ти контрольних склопластикових і вуглепластикових зразків було виявлено більшість дефектів. Не вдалося виявити 7 дефектів в трьох зразках (рис. 1.8), в тому числі: 2 дефекту, розташованих на задній органопластиковий стінці завтовшки 2 мм в стільниковому зразку товщиною 17 мм з незаповненими стільниками (рис. 8, а).



а *б* *в*

Рис. 1.8. [1] Контрольні зразки, в яких не вдалося виявити окремі дефекти: а - стільникова конструкція, частково заповнена пінопластом, з сімома дефектами в передній і задній стінках з монолітного органопластика товщиною 2 мм; б - стільникова повітряна конструкція з тришарового склопластику; в - стільникова конструкція, частково заповнена пінопластом, з металізованими стінками. Дефекти, які не вдалося виявити, вказані стрілками. Також схематично відзначені напрямки теплової стимуляції і зйомки.

На думку авторів, дефекти принципово не можуть бути виявлені одностороннім методом ТК через особливості конструкції зразка; 3 дефекту, розташованих в передній склопластиковій стінці завтовшки 1 мм в стільниковому зразку товщиною 18 мм з незаповненими стільниками (рис. 1.8, б).

Дефекти не вдалося виявити через їх розташування поблизу задньої поверхні стінки. У цьому випадку теплові потоки, відбиті від дефекту і задньої стінки бездефектної зони, створюють на поверхні зразка малі температурні сигнали, які не можна розпізнати тепловізійним методом. 2 дефекти на передній металізованній стінці стільниковго склопластикового зразку з стільниками, заповненими пінопластом (див. рис. 8, в). При використаній тривалісті імпульсу дефекти виявити не вдалося через високу швидкість релаксації надлишкових теплових полів на металевому шарі.

Аналогічні вимірювання були проведені для всіх контрольних зразків із заданими глибинами залягання дефектів. Слід відмітити, що значення глибин залягання дефектів, отримані за оцінними формулами на основі експериментально отриманих оптимальних моментів спостереження, часто не збігалися з глибинами, зазначеними в паспорті зразка. Тому для реальних умов виробництва вважається за доцільним використовувати в процедурі ТК еталонні залежності $l = f(\tau_{max})$, отримані аппроксимацією контрольних вимірів для конкретних елементів конструкції, що мають різні теплофізичні

характеристики, розміри, умови тепловідведення і т.д. Оскільки використане обладнання не дозволило виявити 10% запропонованих дефектів, на даний момент створюється новий діагностичний комплекс, який складається з нагрівача у вигляді матриці дев'яти ксенонових газорозрядних ламп, оригінального швидкодіючого термографа і оригінального програмного забезпечення для управління комплексом і автоматичної обробки даних.

1.5. Постановка основних задач роботи

З проведеного вище огляду методів термографії випливають важливі актуальні завдання. Відомо, що складна структура багатьох матеріалів вносить в їх фізичні властивості суттєві зміни. Однак, в більшості відомих робіт по термографії відсутні відомості про аналіз впливу ефектів пам'яті на теплові процеси. Це стосується як загальних процесів теплопровідності, так і, особливо, діагностики дефектів.

Таким чином, з'ясування впливу структури речовини і ефектів пам'яті на ефективність виявлення дефектів в композитних матеріалах є актуальним завданням і їй присвячено розділ 2 дипломної роботи.

Для використання особливостей впливу ефектів пам'яті на теплові процеси при діагностиці дефектів в композитних матеріалах потрібна розробка специфічних алгоритмів обробки інфрачервоних, теплових зображень поверхонь зразків. Шляхи вирішення цієї проблеми намічені в розділі 3, в якому запропоновані ефективні алгоритми обробки експериментальних даних при здійсненні активної термографії композитних матеріалів.

2. ОСОБЛИВОСТІ ПОШИРЕННЯ ТЕПЛОВИХ ІМПУЛЬСІВ В КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛАХ І ВПЛИВ ЕФЕКТІВ ПАМ'ЯТІ НА ЗАЛЕЖНІСТЬ ТМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ ВІД ЧАСУ

2.1 Ефект пам'яті в композитних матеріалах

Практично всі композитні матеріали по сучасній термінології відносяться до складних макроскопічних об'єктів [10], так само як феромагнетики, спінові стекла і багато інших об'єктів (див. [11]). Найбільш яскравим проявом складності об'єктів є їх ієрархічна будова.

Реальні складні матеріали організовані таким чином, що вони мають високий ступінь кластеризації і самоподібну будову, це проявляється в ступеневому розподілі ймовірностей по числу зв'язків між різними кластерами [12-13]. Більш того, велика кількість макроскопічних систем має кластерну структуру, наявність якої означає, що можна виділити групи елементів, сильно пов'язаних між собою, але зі слабкими зв'язками (або взагалі без зв'язків) з елементами, що не належать даній групі (кластеру).

Такого роду, побудовані з кластерів, структури характеризуються великими значеннями коефіцієнта кластеризації (параметром порядку) і спостерігаються в багатьох реальних системах і матеріалах ([11]). Притаманне їм об'єднання настільки несумісних властивостей, як високий ступінь кластеризації і наявність самоподібної топології змушує припустити, що блоки системи об'єднуються в складну систему ієрархічним чином. Причому самоподібні розподіли елементів системи описуються степеневим законом, оскільки в цьому випадку їх форма не змінюється при варіації масштабу змінної.

У складних системах спостерігається ([14]) відхилення від лінійної залежності з часом t середнього квадрата відстані від джерела $\left\langle r^2 \right\rangle$:

$$\left\langle r^2 \right\rangle \propto t^{\frac{2}{\beta}}, \quad \beta \neq 2$$

При $\beta = 2$ отримуємо звичайну кореневу залежність відстані від часу. При субдифузії $\beta > 2$ наявність пасток призводить до уповільнення процесу дифузії, при супердифузії $\beta < 2$ наявність стрибків призводить до прискорення процесу дифузії.

Виявляється (див. [14]), що транспортні процеси в складних системах відбуваються не тільки досить швидким процесами в звичайному координатному просторі, але і супроводжуються більш повільної еволюцією кластерів.

Наведені вище особливості еволюції складних систем і матеріалів зі складною структурою пов'язані з істотним внеском нелокальності (пам'яті) в процеси переносу.

Властивість процесу зберігати пам'ять про своє минуле називають ередітарностью. Фізично термін ередітарность можна зрозуміти порівнюючи його (від лат. Hereditarity) і з іншими близькими поняттями як: післядія, запізнювання, спадковість, залишковість [15].

Найбільш чітко ефекти пам'яті проявляються в тому, що зовнішні сили, які діють на систему, призводять до виникнення потоку енергії у вигляді інтегрального виразу з функцією пам'яті $M\left(t-t_0\right)$ [16]:

$$j_T\left(t\right) = \int_0^t dt_0 M\left(t-t_0\right) Q\left(t_0\right). \tag{2.1}$$

Коли $M\left(t-t_0\right) \approx \delta\left(t-t_0\right)$, то співвідношення стає локальним. При

$$M\left(t-t_0\right) \approx \left(t-t_0\right)^{\alpha-1}, \tag{2.2}$$

коефіцієнт $0 < \alpha < 1$ характеризує ступінь збереження пам'яті при еволюції в системі:

$$j_T\left(t\right) = j_0 D^{-\alpha} Q\left(t\right). \tag{2.3}$$

Отримане співвідношення між потоком і силою визначає особливості структури композитного матеріалу і буде використано нижче при побудові моделі поширення теплових імпульсів в композитах.

2.2 Закон збереження енергії і різні форми рівняння переносу енергії

Для ефективної реалізації теплових методів активного контролю дефектів в конструкційних матеріалах необхідно використовувати фізичні моделі поширення тепла в матеріалах, які найбільш адекватно описують як самі процеси перенесення в відповідних середовищах, так і властивості середовищ.

Основні фізичні особливості процесів переносу визначаються законами збереження енергії та імпульсу при поширенні потоків тепла в середовищі. У диференціальної формі закон збереження енергії можна просто записати для густини енергії $T(\vec{r},t)$ і густини потоку енергії $\vec{j}_T\left(\vec{r},t\right)$ в стандартній формі, яка враховує, що зміна енергії (температури) $T(\vec{r},t)$ в області заданої точки середовища у відсутності джерел енергії відбувається тільки за рахунок протікання потоку теплової енергії $\vec{j}_T\left(\vec{r},t\right)$ через поверхню, яка оточує цю область:

$$\rho C_v \frac{\partial}{\partial t} T(r,t) + div\left(\vec{j}\right) = 0 . \qquad (2.4)$$

Тут ρ - щільність, а C_v - теплоємність при постійному об'ємі. Зазвичай вважається справедливим закон Фур'є, який локально пов'язує потік густини енергії $\vec{j}_T$ з градієнтом температури:

$$\vec{j}_T = -\lambda \nabla T\left(\vec{r},t\right) , \qquad (2.5)$$

де λ теплопровідність и (2.5) разом з (2.4) призводить до параболічного рівняння теплопровідності:

$$\frac{\partial}{\partial t}T(\vec{r},t)-\kappa\nabla^2 T(\vec{r},t)=0, \qquad (2.6)$$

де $\kappa=\lambda/(\rho C_v)$ температуропровідність і, таким чином, до нескінченної швидкості поширення енергії (точніше, до відсутності фронту при поширенні енергії в речовині). Така модель добре працює задля опису металів через їх однорідність, але принципово не підходить для КМ. В реальності, швидкість поширення енергії завжди кінцева, і хоча цим фактом в випадку металів можна знехтувати з достатньою для більшості задач точністю, в КМ, через їхню неоднорідність, це наближення не працює. В композитах через різну швидкість поширення енергії в смоляній матриці і армуючих елементах утворюється значне запізнювання хвилі, яке особливо сильно помітне при використанні імпульсного ТК (дельта функції нагріву).

Ще Максвелл (див. детальний виклад в [18]) звернув увагу на те, що в загальному випадку досить швидких процесів переносу необхідно враховувати релаксацію потоку енергії між зіткненнями і записав більш загальне співвідношення для потоку енергії, що враховує його зміну з характерним часом τ_j:

$$\tau_j\frac{\partial}{\partial t}\vec{j}_T+\vec{j}_T=-\lambda\nabla T(\vec{r},t) \qquad (2.7)$$

У рівнянні, яке написав Максвелл, цей характерний час релаксації потоку τ_j був константою.

Співвідношення для релаксації потоку разом з законом збереження енергії (2) призводить вже до гіперболічного рівняння для температури (густини енергії), тобто до гіперболічного рівняння теплопровідності

$$\tau_j\frac{\partial^2}{\partial t^2}T(\vec{r},t)+\frac{\partial}{\partial t}T(\vec{r},t)-\kappa\nabla^2 T(\vec{r},t)=0, \qquad (2.7)$$

тобто до появи кінцевої швидкості поширення температури і фронтів щільності енергії у хвилі , що розповсюджується від джерела на поверхні всередину матеріалу. У випадку дії зовнішніх джерел $Q(\vec{r},t)$ рівняння набуває загальний вигляд:

$$\tau_j \frac{\partial^2}{\partial t^2} T(\vec{r},t) + \frac{\partial}{\partial t} T(\vec{r},t) - \kappa \nabla^2 T(\vec{r},t) = \frac{1}{\rho C_v} \left(Q + \tau_j \frac{\partial}{\partial t} Q \right), \tag{2.8}$$

У найпростішому випадку одновимірної еволюції рівняння теплопровідності має вигляд:

$$\tau_j \frac{\partial^2}{\partial t^2} T(x,t) + \frac{\partial}{\partial t} T(x,t) - \kappa \frac{\partial^2}{\partial x^2} T(x,t) = Q(x,t), \tag{2.9}$$

Розв'язок цього рівняння записується в загальному вигляді через функцію Гріна $G(t,\vec{r};t_0,\vec{r}_0)$ (див. [18]-[19]):

$$T(t,\vec{r}) = \frac{1}{\rho C_v} \int dt_0 \int d\vec{r}_0 G_q(t,\vec{r};t_0,\vec{r}_0) \left(Q(t_0,\vec{r}_0) + \tau_j \frac{\partial}{\partial t_0} Q(t_0,\vec{r}_0) \right) \tag{2.10}$$

а сама функція Гріна G задовольняє рівнянню з дельта-функціями за координатами і часу в правій частині. Функцію Гріна можна записати у вигляді:

$$G(t,x) = \frac{u_T}{2\kappa} \exp\left(-\frac{t}{2\tau_j} \right) I_0(\xi) \theta(u_T t - |x|) ,$$

$$u_T = \sqrt{\kappa / \tau_j} \ , \ \xi = 0.5 \sqrt{\left(\frac{t}{\tau_j} \right)^2 - \left(\frac{x}{u_T \tau_j} \right)^2} \tag{2.11}$$

$I_0(x)$ - функція Бесселя порядку нуль, $\theta(x)$ - тета функція Хевісайда.

Функція $G(t,x)$ при наближенні величини τ_j до нуля $\tau_j \to 0$ прямує до функції виду:

$$G(t,x) \underset{\tau_j \to 0}{\approx} \frac{1}{2\sqrt{\pi\kappa t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4\kappa t}\right), \tag{2.12}$$

тобто яка, як видно, збігається зі стандартним розв'язком звичайного рівняння теплопровідності. Скориставшись функцією Гріна і (2.10), можна отримати розв'язок для температурного імпульсу $T(t,x)$, що виникає у відповідь на локалізоване джерело Q у вигляді дельта-функції Дірака:

$$T(t,x) = \frac{Q_0}{4\lambda} \exp\left(-\frac{t}{2\tau_j}\right)\left(\Psi_{imp}(\xi) + \Psi_w(\xi)\right) \tag{2.13}$$

Тут $\Psi_{imp}(\xi) = 2I_0(\xi)u_T\delta\left(u_T t - |x|\right)$, $\Psi_w(\xi) = \left(I_0(\xi) + \frac{t}{\tau_j \xi} I_1(\xi)\right)\theta\left(u_T t - |x|\right)$, Q_0 - енергія в імпульсі. Розв'язок має дві складові: Імпульс, який поширюється з загасанням і хвильовий слід, який залишається за рухомим імпульсом. При часі $\frac{t}{\tau_j} >> 1$ можна скористатися виразом $I_m(\xi) = \frac{\exp(\xi)}{\sqrt{2\pi\xi}}$ і записати хвильовий слід:

$$T_w(t,x) = \frac{Q_0}{4\sqrt{2\pi}\lambda} \exp\left(-\frac{t}{2\tau_j}\right)\frac{\exp(\xi)}{\sqrt{\xi}}\left(1 + \frac{t}{\tau_j \xi}\right)\theta\left(u_T t - |x|\right) \tag{2.14}$$

Поверхня, яка представляє еволюцію поля температур від зосередженого джерела в формі дельта-функції Дірака в залежності від просторової координати і часу показана на Рис. 2.1

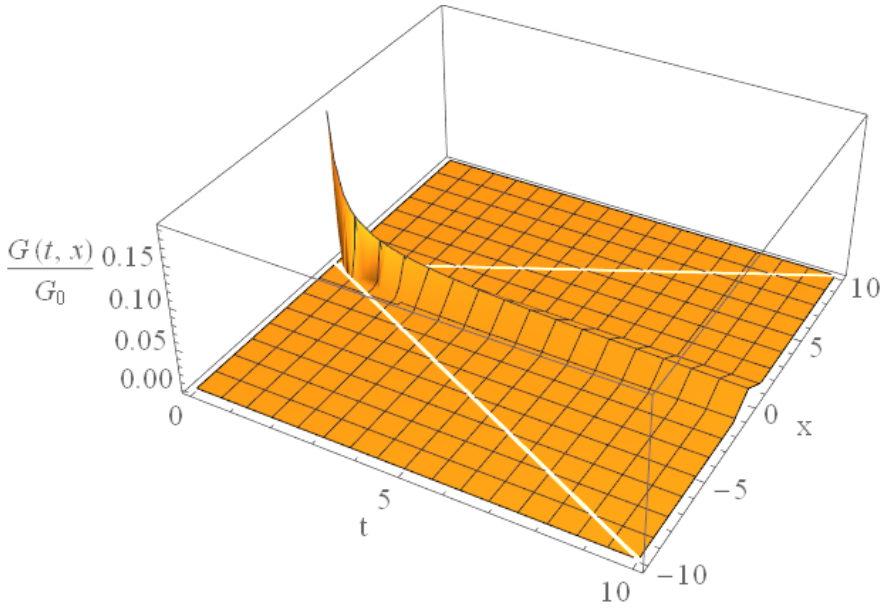


Рис.2.1 Поверхня, еволюції поля температур від джерела в формі дельта-функції Дірака

2.3 Динамічні властивості температурних полів в композитних матеріалах з дефектами

Скориставшись узагальненням звичайної похідної за часом на дробову похідну з ядром $M\left(t-t_0\right)\approx\left(t-t_0\right)^{\alpha-1}$, які представляють властивості пам'яті, напишемо співвідношення для температури і теплового потоку:

$$D_t^{1-\alpha}T(r,t)+div\left(\vec{j}_T\right)=0 \tag{2.15}$$

$$\tau_j D_t^{1-\alpha}\vec{j}_T\left(t\right)+\vec{j}_T\left(t\right)=j_0\nabla T\left(\vec{r},t\right) \tag{2.16}$$

З цих співвідношень ми отримуємо узагальнене рівняння теплопровідності в формі:

$$\tau_j D_t^{2-\alpha}T\left(t,\vec{r}\right)+D_t^{1-\alpha}T\left(t,\vec{r}\right)-\kappa\nabla^2T\left(t,\vec{r}\right)=Q\left(t,\vec{r}\right) \tag{2.17}$$

Це узагальнене рівняння теплопровідності має розв'язок, який можна наближено записати у звичайній інтегральної формі (2.10) с з функцією $G_q(t,x)$, :

$$G_q(t,x)=\frac{u_T}{2\sqrt{2\pi\kappa}}\exp_q\left(-\frac{t}{2\tau_j}\right)\frac{\exp_q(\xi)}{\sqrt{\xi}}\theta\left(u_T t-|x|\right), \qquad (2.18)$$

де функція $\exp_q(x)=\left(1+(q-1)x\right)^{\frac{1}{q-1}}$, є узагальненням експоненти і враховує пам'ять в системі через параметр $q=1-\alpha$. Важливо враховувати, що узагальнена експонента, природно, переходить в звичайну експоненту в умовах $q\to 1$, тобто $\exp_q(x)\underset{q\to 1}{\to}\exp(x)$.

Для температури джерела в формі функції Дірака у граничному випадку малих значень часів релаксації теплового потоку, тобто у випадку $\tau_j\to 0$, вираз для функції Гріна набуває вигляду:

$$G_q(t,x)\underset{\tau_j\to 0}{\approx}\frac{1}{2\sqrt{\pi\kappa t}}\exp_q\left(-\frac{x^2}{4\kappa t}\right).$$

У випадку пригнічених ефектів пам'яті $q\to 1$ в середовищі поширення теплового імпульсу функція Гріна має стандартний вигляд зі звичайною експонентою:

$$G_q(t,x)\underset{\substack{\tau_j\to 0\\ q\to 1}}{\approx}\frac{1}{2\sqrt{\pi\kappa t}}\exp\left(-\frac{x^2}{4\kappa t}\right).$$

З урахуванням пам'яті хвильовий слід, який залишається за рухомим імпульсом при часі $\frac{t}{\tau_j}>>1$ має вигляд:

$$T_w(t,x)=\frac{Q_0}{4\sqrt{2\pi}\lambda}\exp_q\left(-\frac{t}{2\tau_j}\right)\frac{\exp_q(\xi)}{\sqrt{\xi}}\left(1+\frac{t}{\tau_j\xi}\right)\theta\left(u_T t-|x|\right) \qquad (2.19)$$

Вже з цих співвідношень видно, що зручно представляти динаміку в часі в подвійному логарифмічному масштабі і, тим самим, в областях степеневої залежності температурного поля від часу на графік буде наближатися до відповідної прямої.

Дійсно, для випадку пригніченою пам'яті, отримуємо залежність:

$$\ln T(t,x)=\left(\ln\left(\frac{1}{2\sqrt{\pi\kappa}}\right)-\frac{x^2}{4\kappa t}\right)+0.5\ln t\ , \qquad (2.20)$$

з якої видно, що воно в змінних $\ln G$ - $\ln t$ являє собою криву, яка близька до прямої $\ln G=a+b\ln t$

Вплив ефектів пам'яті відповідно до співвідношення (2.19) можна представити параметром q.

3. АЛГОРИТМІЧНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОБРОБКИ ДАНИХ АКТИВНОЇ ТЕРМОГРАФІЇ

3.1 Методи усереднення і регуляризації для обробки часових рядів зображень поверхні композитних матеріалів

Визначення динаміки частинок або еволюції процесів переносу в середовищах відповідно до заданих початкових умов називаються прямими задачами. Проблеми діагностики будь-яких процесів, пов'язаних з визначенням еволюції за експериментальними даними, визначених з кінцевою точністю, зазвичай є зворотними, некоректними задачами.

Поняття коректності задачі вперше з'явилося в дослідженнях математика Ж. Адамара при розв’язанні різних крайових задач для рівнянь математичної фізики. Адамар висловив думку, що крайові задачі, розв’язання яких не відповідає певним умовам безперервності, не мають фізичного змісту, і навів приклади таких задач. Однак, згодом з'ясувалося, що багато задач математичної фізики, які є некоректними в сенсі Адамара, мають реальний фізичний зміст [20].

Нехай z_T це точний розв’язок рівняння $Az = u_T$, тобто $Az_T = u_T$. Часто замість точних почтакових даних ми маємо наближені початкові дані і оцінку їх похибки δ . Задача полягає в тому, щоб за відомими початковими даними знайти наближення z_δ до елементу z_T, яке має властивість стійкість до малих змін u_δ.

Очевидно, що в якості наближеного розв’язку рівняння неможна брати точний розв’язок цього рівняння з наближеною правою частиною $u = u_\delta$, тобто елемент z_δ, який визначається за формулою $z_\delta = A^{-1}u_\delta$, оскільки він не існує для будь-якого елемента $u \in U$ і не має властивості стійкості до малих змін правої частини.

Тихоновим і ін. були розроблені методи регуляризації, в рамках яких задача визначення стійкого розв'язання некоректних задач діагностики. В методах регуляризации z_δ визначається за допомогою оператора $R(\alpha)$ [20], залежного від параметра α, значення якого треба брати узгодженими з похибкою початкових даних u_δ. Ця узгодженість повинна бути такою, щоб при наближенні правої частини рівняння до точного значення, наближений розв'язок прямував би до шуканого точного розв'язку рівняння.

Такий оператор $R(\alpha)$, залежний від параметра α і діючий з U в F, називається регулярізуючим для рівняння $Az = u$.

У якості наближеного розв'язку рівняння з наближено відомою (а в загальному випадку і не диференціюємою) правою частиною u_δ можна обрати елемент $z_\alpha = R(\alpha(\delta))\tilde{u}$, отриманий за допомогою регулярізуючого оператора $R(\alpha)$, де функціонал $\alpha = \alpha(\delta)$ узгоджений з похибкою початкових даних u_δ. Цей розв'язок називається регуляризованим розв'язком рівняння. Числовий параметр α називається параметром регуляризації.

Нижче продемонструємо, що інтегро-диференційні оператори (див. визначення [17] і основи дрібного аналізу) можуть служити операторами регуляризації [21].

Математичний апарат дробового числення на даний час добре розвинений. Прості міркування, що призводять до введення дробових інтегралів і похідних наводяться в класичних роботах Ліувілля, Летникова, Соніна та ін.

Інтегро-диференційний оператор дробового порядку можна визначити, як інтегральними співвідношеннями, як це робилося при розгяді пам'яті в системі, так і як пряме узагальнення похідної n-го порядку в дискретному виді (підхід Лєтникова).

Розглянемо визначення похідною n-го порядку з допомогою межі виразів кінцевої різниці n-го порядку:

$$Df(x)=\lim_{h\to 0}\frac{f(x)-f(x-h)}{h},\qquad D^n f(x)=\lim_{h\to 0}\frac{f(x)+\sum_{k=1}^{k=n}(-1)^k\binom{n}{k}f(x-kh)}{h^n}. \qquad (3.1)$$

Формальний перехід до дробової похідної відбувається шляхом заміни в цьому співвідношенні цілого числа n на дробове число α. Таким чином, отримуємо визначення похідної дробового порядку (дробової похідної):

$$D^{\alpha}f(x)=\lim_{h\to 0}\frac{f(x)+\sum_{k=1}^{k=\infty}(-1)^k\binom{\alpha}{k}f(x-kh)}{h^{\alpha}}. \qquad (3.2)$$

Таке визначення операторів дробового порядку призводить до наступних важливих загальних властивостей дробових операторів:

$$D^{-\alpha}f(t)\equiv I^{\alpha}f(t),\ D^{\alpha}D^{-\alpha}f(t)=f(t)$$

$$D^{-\alpha}D^{\alpha}f(t)=f(t)-\{D^{-(1-\alpha)}f(t)\}\Big|_{t=0}\frac{t^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha)} \qquad (3.3)$$

$$D^{\beta}D^{-\alpha}f(t)=D^{\beta-\alpha}f(t),\ \beta\ge\alpha\ge 0$$

Нехай $\varphi(x)$ реальний процес, який відбувається в досліджуваній фізичній системі, який визначається звичайним диференційним рівнянням другого порядку. Основним оператором, що призводить до нестійкості в такому рівнянні, є оператор другої похідної.

Наприклад, в найпростішому випадку це рівняння з однією другої похідної можна записати в інтегральному вигляді в формі рівняння $Az=u$ з оператором $\hat{A}=D^{-2}$. Покажемо, що регулярізуючий оператор для оператора D^{-2} має форму

$$R^{\alpha}=D^{2-\alpha}. \qquad (3.4)$$

При цьому, стійкі уявлення всіх змінних можна отримати з відповідних часових рядів, які отримуємо з експерименту.

Розв'язок єдиний і стійкий, якщо для рівняння порядку n_e задані наступні початкові умови [17]:

$$\begin{gathered} \mathrm{D}^{-\alpha}\,\mathrm{y}\big|_{\mathrm{t}=0} = \mathrm{D}^{0}\,\mathrm{z}\big|_{\mathrm{t}=\mathrm{o}} = (\mathrm{z})_{0} \ , \\ \mathrm{D}^{1-\alpha}\,\mathrm{y}\big|_{\mathrm{t}=0} = \mathrm{D}^{1}\,\mathrm{z}\big|_{\mathrm{t}=0} = \left(\frac{\mathrm{dz}}{\mathrm{dt}}\right)_{0} \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ D^{n_e-1-\alpha}\,y\big|_{t=0} = D^{n_e-1}\,z\big|_{t=0} = \left(\frac{d^{n_e-1}z}{dt^{n_e-1}}\right)_{0} \end{gathered} \tag{3.5}$$

Оператор регуляризації для оператора максимального порядку D^{n_e} має форму $R^{\alpha} = D^{n_e-\alpha}$, дійсно:

$$\lim_{\alpha\to 0}\left(R^{\alpha}D^{-n_e}z\right) = \lim_{\alpha\to 0}\left(D^{n_e-\alpha-n_e}z\right) = \lim_{\alpha\to 0}\left(D^{-\alpha}z\right) = z \tag{3.6}$$

і відповідно до теореми Тихонова [20] оператор R^{α} є оператором регулярізації.

Оператор регуляризації відіграє роль зворотнього оператора в рівнянні еволюції фізичних макроскопічних величин, наприклад густини, тиску або температури.

Іншими словами, в нашому випадку член еволюційного рівняння зі старшою похідною повинен бути замінений на R^{α} (Для отримання стійкого і єдиного розв'язку). Однак порядок диференційного рівняння (оператора) може бути збережений, якщо ми введемо нові згладжені змінні, з використанням регулярізуючого оператора [21]:

$$D^{n_e-\alpha}y = D^{n_e}z(t)\ , \quad z(t) = R_f^{\alpha}y(t), \quad R_f^{\alpha} = D^{-\alpha} \tag{3.7}$$

Інтегральний оператор згладжування змінних $R_f^{\alpha} = D^{-\alpha}$ перетворює нестійкий розв'язок динамічної системи в стійкий спостерігаємий стан. Регулярізуючий параметр повинен задовольняти наступні умові: якщо коефіцієнт кореляції наближається до нуля, то параметр регуляризації повинен теж наближатися до нуля.

Використання методів адаптивного усереднення за допомогою фільтрів на основі дрібного аналізу і операторів регуляризації дозволяє очистити зображення від шумів і проявити динаміку температурного поля, яка необхідна для виявлення дефектів і їх основних параметрів.

Приклад застосування регуляризації для видалення шуму і виявлення сигналу на його тлі показаний на Рис.3.1 і Рис. 3.2.

На Рис. 3.1 наведено початкові дані, а на Рис.3.2 показаний сигнал з видаленим шумом.

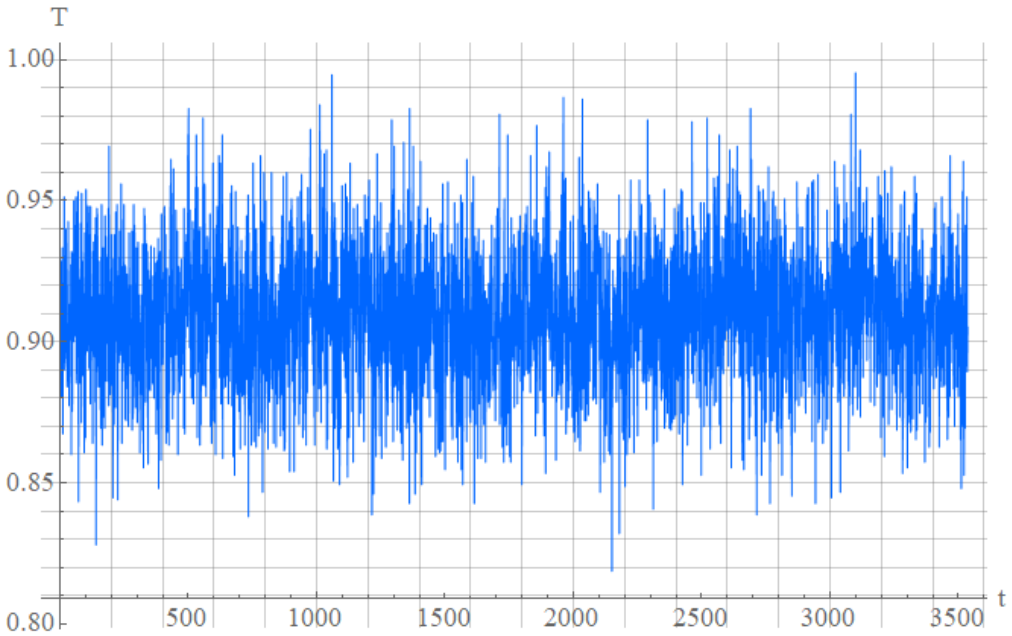


Рис.3.1 Приклад почткових даних з шумом



Рис.3.2 Сигнал, виділений з даних з Рис.3.1 після застосування дробового інтегрального оператора регуляризації $R_f^{\alpha} = D^{-\alpha}$ ($\alpha = 0.5$)

Відзначимо, що досить складне завдання визначення похідних довільного порядку від часового ряду, що представляє результати експерименту, можна отримати з використанням методу (див. [23]).

3.2 Визначення параметрів дефектів по зображенням поверхні композитних матеріалів

Після виконання того чи іншого алгоритму відділення сигналу від шуму можна проводити апроксимацію відновленої послідовності, очищеної від шумів, аналітичними моделями і отримувати значення коефіцієнтів кореляції або пам'яті, введені в попередньому розділі.

$$\ln T_w = \ln \exp_q\left(-\frac{t}{2\tau_j}\right) + \ln \exp_q(\xi) - 0.5\ln\xi + \ln\left(1+\frac{t}{\tau_j \xi}\right)$$

$$\ln \exp_q(x) = \frac{1}{q-1}\ln\left(1+(q-1)x\right)$$

Відповідно до отриманих співвідношенн для температури, видна суттєва залежність від ступеня кореляцій. На Рис. 3.3 зображено залежність відносної зміни температури з часом для різних значень.

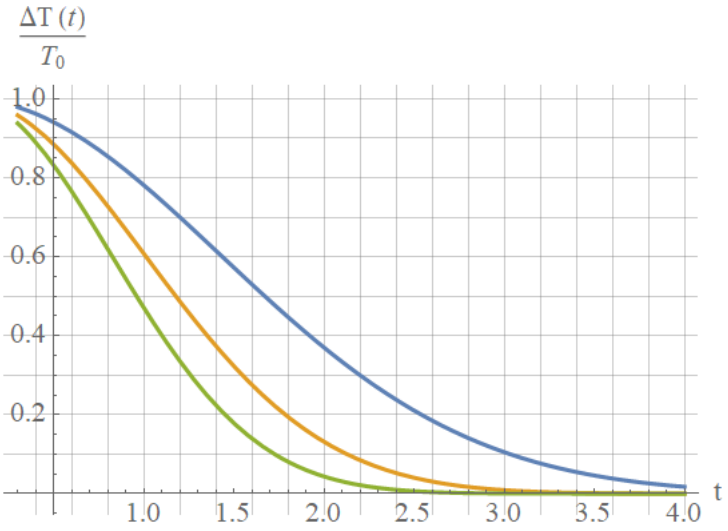


Рис. 3.3 Залежність відносної Зміни температури з часом для різніх значень q = 0.99 - верхня крива, q = 0.98 - середня крива і q = 0.97 - нижня крива.

Ці ж залежності можна зобразити в логарифмічному масштабі (див. Рис. 3.4)

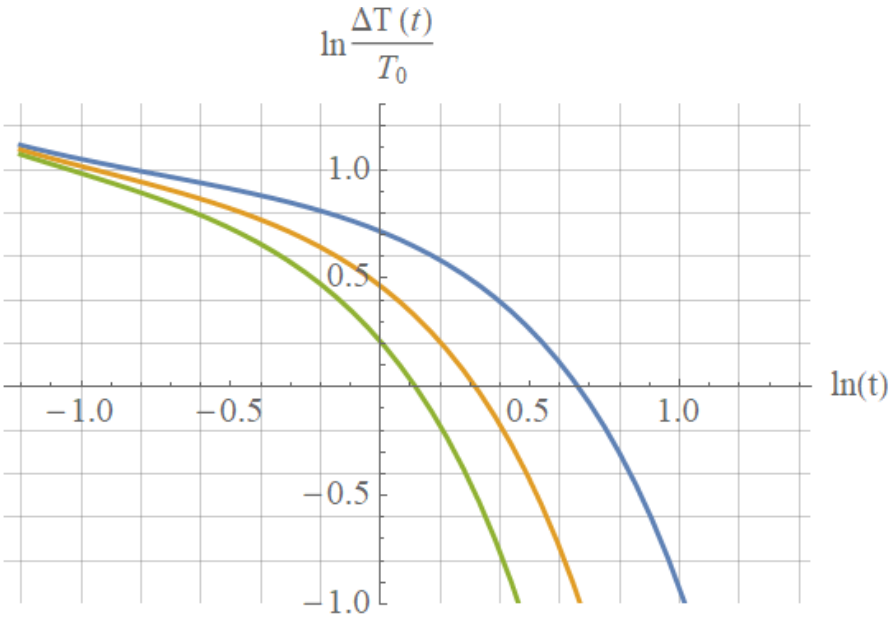


Рис. 3.4 Залежність логарифма відносної зміни температури з логарифмом часу для різніх значень q = 0.99 - верхня крива, q = 0.98 - середня крива і q = 0.97 - нижня крива.

Проведені оцінки показують високу чутливість залежності температури від кореляційних властивостей середовища (ефектів пам'яті композитних матеріалів), тому порівнюючи отримані аналітичні вирази з експериментальними даними можна оцінити значення коефіцієнтів кореляції в середовищі і потім - параметри дефектів.

Кореляції, які вносяться в температурне поле дефектами призводять до відхилень залежності температури поверхні від бездефектного варіанту, і ці відхилення найбільш чітко видно при аналізі похідних.

Визначення похідних за експериментальними даними є некоректною задачею, яка може бути розв’язана з використанням операторів регуляризації і відповідних фільтрів.

Для визначення параметрів дефектів за значеннями кореляції, "виміряним" за експериментальними даними необхідно провести серію спеціальних вимірювань для уточнення цього зв’язку.

ВИСНОВКИ

В роботі було виконано аналітичний огляд існуючих методик застосування активної термографії для виявлення дефектів в композитних матеріалах літаків. Розглянуто вплив ефектів пам'яті та ієрархічності структури композитних матеріалів на поширення в них тепла із застосуванням дробових інтегро-диференційних операторів.

Отримано аналітичні асимптотичні вирази, які наближено описують поширення тепла від зосереджених джерел на поверхні композитних матеріалів.

Розроблено оригінальні аналітичні алгоритми виділення сигналу з шуму при використовуванні оператора регуляризації на базі дробових інтегро-диференційних операторів Ліувіля і Лєтнікова, які можуть бути використані в реальних умовах застосування задля очищення термограм від шумів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Э.Ю. Гордиенко , Н.И. Глущук , Ю.В. Фоменко , Г.В. Шустакова , И.И. Дзешульская , Ю.Ф. Иванько. Диагностика Композитных Материалов Элементов Самолетов Методом Активной Термографии
2. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. М.: ИД Спектр, 2009. - 544с.: ил. и цветраня вставка 16с.
3. Awais Butt. Engineering Applications of Composite Materials
4. Muflih Alhammad , Luca Zanotti Fragonara and Nicolas P. Avdelidis. Diagnosis of Composite Materials in Aircraft Applications–Brief Survey of Recent Literature.
5. Makhlouf, A. S. H.; Aliofkhazraei, M., Handbook of Materials Failure Analysis with Case Studies from the Construction Industries.
6. Butterworth-Heinemann Imprint Elsevier Science & Technology Books, Elsevier Science & Technology Distributor: San Diego, Oxford, 2018; p. 560 p.
7. Ciampa, F.; Mahmoodi, P.; Pinto, F.; Meo, M., Recent Advances in Active Infrared Thermography for NonDestructive Testing of Aerospace Components.
8. Коротких А.Г. Теплопроводность материалов: учебное пособие / А.Г. Коротких; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 97 с
9. R. Berman. Thermal conduction in solids
10. А.И. Олемской, А.С. Вайленко, И.А. Шуда.– Сумы: Издательство СумГУ, Методические указания на тему «Различные формулировки статистической теории сложных систем» 2008. – 22 с
11. Е.И, Кац м В.В. Лебедев, Физика мягкой матреии
12. А. И. Олемской, Сложность самоподоюных иерархических самоподчиненных ансамблей
13. А. И. Олемской, Иерархические уровни
14. А. И. Олемской, Иерархическая картина супердиффузии
15. В. Вольтерра, Теория функционалов, интегральных и интегро-дифференциальных уравнений.

16. Учайкин В. В. Метод дробных производных. В. В. Учайкин – Ульяновск: Издательство «Артишок», 2008. – 512 с

17. С.Г. Самко, А.А. Килбас, О.И. Маричев, Интегралы и производные дробного порядка и некоторые их приложения.

18. Д. Жоу, Х. Касас-Баскес, Дж. Лебон, Расширенная необратимая термодинамика.

19. А.Г. Свешников, А.Н. Боголюбов, В.В. Кравцов, Лекции по математической физике.

20. А.Н. Тихонов, Методы решения некорректных задач.

21. V. Novikov, S. Kruchinin , N. N. Bogolubov JR. and S. Adamenko, Self-organisation and nonequIlibrium structures in the phase space.

22. V. Novikov, S. Kruchinin, F. Garaschenko, Quntum Analysis of oscillatiry processes in fractal media.

23. William H. Press,Saul A. Teukolsky, William T., Brian P. Flannery, Volume 1 of Fortran Numerical Recipes.