

КИЇВСЬКИЙ МІЖНАРОДНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОЇ АВІАЦІЇ

На правах рукопису

Протасов Анатолій Георгійович

РОЗВИТОК МЕТОДІВ АКТИВНОЇ ТЕПЛОВОЇ
ДЕФЕКТОСКОПІЇ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЇ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ

Спеціальності: 05.22.14 - "Експлуатація повітряного транспорту",
05.11.13- "Прилади і методи контролю та захисту навколишнього середовища, речовин, матеріалів та виробів"

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеню
кандидата технічних наук

Київ - 1995

AB 32.841

Роботок є рукопис

Роботу виконано на кафедрі Приладів та систем неруйнівного контролю Київського політехнічного інституту

Науковий керівник - доктор технічних наук, професор
Маєвський С. М.

Консультант - кандидат технічних наук, доцент
Синеглазов В. М.

Офіційні опоненти - доктор технічних наук, професор
Ветров А. М.

кандидат технічних наук, професор
Чигринець А. Д.

Провідна організація - АНТК ім. О. К. Антонова

Захист відбудеться 28 вересня 1995р.

о ___ год ___ хв. в конференц залі, на засіданні спеціалізованої
Ради Д01.35.04 при Київському міжнародному університеті
цивільної авіації за адресою: 252058, Київ-58, пр. Космонавта
Комарова, 1

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00755417 (Т)

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці інституту

Автореферат розісланий "18" серпня 1995р.

Вчений секретар спеціалізованої Ради,
доктор технічних наук

Кулик

М. С. Кулик



1. АНОТАЦІЯ

В дисертаційній роботі розглянуто питання діагностування активними тепловими методами композиційних матеріалів (КМ), які використовуються у авіаційній техніці.

1.1. Мета роботи

МЕТОЮ дисертаційної роботи є підвищення ефективності методів та засобів діагностування авіаційних матеріалів та елементів конструкцій повітряних суден на основі теоретичного та експериментального дослідження методів активного теплового неруйнівного контролю (АТНК).

1.2. Для досягнення поставленої мети у дисертаційній роботі поставлено такі ЗАДАЧІ:

- дослідження можливостей контактних методів АТНК на імітаційній моделі, адекватній реальним об'єктам контролю з дефектами та експериментальне дослідження на цих об'єктах;
- розробка нових, більш точних методів визначення параметрів дефектів;
- практична реалізація отриманих результатів досліджень в апаратурі АТНК;
- впровадження у виробництво основних результатів наукових досліджень для діагностування елементів конструкцій авіаційної техніки, вироблених з композиційних матеріалів.

1.3. На захист виносяться такі ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ:

1. Методи визначення геометричних параметрів дефектів у КМ, засновані на використанні двуступеневої процедури оптимізації при їх прямокутній схематизації.

2. Методика визначення геометричних параметрів дефектів у КМ, заснована на багатовимірній апроксимації при їх прямокутній схематизації.

3. Структурна схема дефектоскопу контактного типу з багатоелементним тепловим зондом, що дозволяє підвищити ефективність та вірогідність контролю, а також визначати параметри дефектів.

4. Програмне забезпечення, реалізуюче рішення прямих та зворотніх задач, які дозволяють оптимізувати дефектоскопи, що проектуються, а також проводити дослідження їх експлуатаційних властивостей.

2. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

2.1. Актуальність роботи

Аналіз розвитку авіаційної техніки показує, що перспективи її удосконалення пов'язані з використанням нових конструкційних ма-

теріалів, в тому числі композиційних. Заміна традиційних матеріалів на КМ в основних деталях та вузлах літаків приводить до зниження їх маси на 20% - 40%, збільшенню їх ресурсу в 1.5 - 2 рази. Достоїнством цих матеріалів, що визначає економічну ефективність їх використання, є зниження трудомісткості виготовлення агрегатів в результаті зменшення кількості комплектуючих деталей.

Однак, вироби з КМ в процесі експлуатації підлягають комбінованому впливу температури та вологості навколишнього середовища, що погіршує їх несучу спроможність. Під впливом термомеханічних навантажень відбувається старіння та деструкція полімерної матриці КМ, що веде до утворення різноманітних дефектів. Деякі з них носять небезпечний характер, наприклад, тріщини базових елементів планеру літака, тріщини на дисках турбін авіадвигунів і т. і.

Враховуючи, що конструкційні матеріали несуть певне сидове навантаження, на їх надійність та міцність накладаються підвищені вимоги. Тому актуальною задачею є пошук ефективних методів контролю їх якості, що дозволяють знайти приховані дефекти та оцінити їх параметри для визначення ступеню небезпечності.

Традиційні методи неруйнівного контролю часто не дають задовільних результатів для нових матеріалів. Одним з перспективних методів є АТНК (ГОСТ 4177 - 85).

Переваги АТНК перед іншими методами підтверджені великою кількістю проведених досліджень, це: інформативність, швидкість, метод має відносно просту апаратну реалізацію.

В той же час рівень практичної реалізації потенційних достоїнств АТНК відносно низький: галузь його застосування на виробництві та в наукових дослідженнях значно менша, ніж у інших більш відомих методів. Аналіз причин цієї невідповідності, проведений в дисертації, показав необхідність більш глибоких теоретичних та експериментальних досліджень у цій галузі, пов'язаних з подальшим розвитком АТНК.

2.2. Методи дослідження

Під час вирішення поставлених у роботі теоретичних та практичних задач використано методи чисельного моделювання, оптимізації та обчислювальної математики. Експериментальні дослідження проводилися на сучасному обладнанні, включаючи тепловізор ТВ-03.

Обробка результатів моделювання та експерименту проводилась з використанням методів математичної статистики.

2.3. Наукова новизна

1. Досліджено контактний метод АТНК композиційних матеріалів на запропонованій імітаційній моделі, що враховує їх особливості.

2. Запропоновано контактний метод контролю КМ, що дозволяє спростити операцію контролю, виключивши з неї використання еталонних зразків.

3. Запропоновано метод визначення параметрів дефектів, що заснований на використанні алгоритму багатовимірної апроксимації.

4. Розроблено та досліджено захищений авторським свідоцтвом новий спосіб визначення параметрів дефектів, що заснований на використанні двохступеневої процедури оптимізації.

5. Розроблена методика підвищення точності оцінювання параметрів дефектів, яка використовує метод найменших квадратів з регуляризацією в сполученні з методом конфігурацій, та дозволяє визначати параметри дефектів з похибкою, що не перевищує 10% - 20%.

6. Розроблено дефектоскоп з багатоелементним тепловим зондом, який дозволяє підвищити ефективність контролю, та захищений авторським свідоцтвом.

2.4. Практична цінність результатів роботи

У дисертаційній роботі здобувачем отримані такі важливі практичні результати.

1. Розроблений тепловий дефектоскоп, який забезпечує підвищення достовірності виявлення у КМ дефектів та обчислення їх геометричних розмірів.

2. Розроблені нові методики оцінки геометричних параметрів дефектів, які дозволяють підвищити ефективність контролю.

3. Розроблено пакет прикладних програм, які дозволяють оптимізувати теплові дефектоскопи, що проектуються, а також досліджувати їх експлуатаційні властивості.

2.5. Реалізація результатів роботи

Результати дисертаційної роботи впроваджені на:

- заводі N 410 МЦА - у вигляді методики контролю процесів відновлення кілець компресорів авіаційних двигунів;

- Таганрогському АНТК ім. Г.М.Верієва - у вигляді дефектоскопу для контролю якості виробів із КМ.

Наукові положення та висновки роботи використовуються у:

- Київському політехнічному інституті в учбовому процесі;

- НДІ електромеханіки - для розробки технології з'єднання елементів з КМ.

2.6. Апробація роботи та публікації

Матеріали дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на 5 всесоюзних та республіканських конференціях. Результати роботи опубліковані у 17 друкованих роботах, у тому числі в монографії "Активная тепловая интроскопия", у журналу НАН України "Техническая диагностика и неразрушающий контроль" та журналу АН Росії: "Дефектоскопия", у збірниках наукових праць та 6 авторських свідоцтвах.

2.7. Структура та розмір роботи

Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновку, переліку літератури та додатку. Основний її текст викладено на 186 машинописних сторінках, ілюстровано 40 малюнками та 5 таблицями на 44 сторінках. Список цитованої літератури містить 104 назви.

3. ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступній частині роботи обґрунтовується актуальність теми, що стала предметом досліджень, показана перевага КМ перед традиційними матеріалами, наведені приклади їх використання в авіаційній техніці.

У першому розділі приводяться особливості використання композиційних матеріалів у авіаційній техніці, показані причини виникнення дефектів у конструкціях з КМ в процесі експлуатації літальних апаратів.

Відзначається особлива роль методів неруйнівного контролю при оцінці стану цих конструкцій.

Обґрунтовується перспективність використання для авіаційної техніки методів активного теплового неруйнівного контролю, які можуть бути використані також для контролю якості ущільнювальних матеріалів.

У розділі зроблено огляд робіт, які присвячені теоретичному та експериментальному дослідженню методів АТНК.

Аналіз розглянутих робіт показує, що механізм безконтактних методів вивчено досить глибоко, теоретичні та експериментальні дослідження дозволяють визначити його граничні можливості. Проблемам контактних методів АТНК присвячена значно менша кількість робіт, в основному вони носять експериментальний характер. Недоліком цих методів є низька продуктивність.

Однак, порівняння цих двох груп методів контролю дозволяє зробити висновок, що для елементів літальних апаратів, вироблених з КМ, використання контактних методів має перевагу.

Ці методи є більш вірогідними, тому що тут виключено вплив таких

факторів як нерівномірність коефіцієнту випромінювання поверхні об'єкту, коливання температури навколишнього середовища, наявність зовнішніх джерел випромінювання та т.п.

Відмічається, що у залежності від поставленої перед АТНК мети вирішальні задачі можуть бути класифіковані як прямі та зворотні. Рішення прямої задачі АТНК знаходиться у визначенні температурного поля на поверхні об'єкту, винесенні якісної оцінки його структури по простірночасовим параметрам цього поля та прийняття висновку про наявність або відсутність дефекту. Рішення зворотної задачі АТНК дозволяє дати кількісну оцінку виявленому дефекту - визначити його параметри.

Існуючі зараз методи визначення характеристик дефектів не забезпечують потрібної точності, їх реалізація досить трудомістка.

У другому розділі викладені теоретичні та експериментальні результати досліджень контактних методів діагностування КМ. Теоретичні дослідження проводились на запропонованій автором імітаційній моделі процесу АТНК.

Процес нагрівання тепловим зондом об'єкту контролю з неоднорідністю може бути описаний двомірним нестационарним рівнянням теплопровідності:

$$C_V \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y}). \quad (1)$$

Тут x, y - поточні координати; C_V - об'ємна теплоємність; λ_x, λ_y - коефіцієнти теплопровідності у напрямку осей x та y відповідно; T - шукана температура; t - час.

Теплообмін поверхні системи з навколишнім середовищем описується законом Ньютона (граничні умови 3-го роду).

В початковий момент часу ($t = 0$) тепловий зонд має температуру на 20- 40°С вищу за об'єкт контролю.

Тепловий потік, що надходить в матеріал через контактну поверхню, може бути визначений за формулою:

$$q(t, y) = yT \left(\lambda_y + \frac{y}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\lambda_y}{\sqrt{a_y}} \cdot \frac{1}{\sqrt{t}} \right), \quad (2)$$

де a_y - коефіцієнт температуропровідності.

Тоді, електричний сигнал, що викликаний проходженням теплового потоку через чутливий елемент, пропорційний інтегральному значенню потоку по усій поверхні контакту:

$$E(t) = \frac{1}{K} \int_{X_1}^{X_2} q_1(t, y) dx + \varepsilon(t). \quad (3)$$

Тут X_1 та X_2 - межа поверхні контакту по осі X ; K - коефіцієнт перетворення чутливого елемента; $\varepsilon(t)$ - шуми, що викликані випадковими змінами інтенсивності нагріву об'єкту, нерівномірністю поверхні об'єкту, випадковими змінами теплофізичних характеристик (ТФХ) матеріалу об'єкту і т. і.

Чисельна реалізація запропонованої математичної моделі була здійснена методом скінчених елементів, який є одним з основних методів чисельного розв'язання рівнянь теплопровідності АТНК.

Автором розроблена програма розрахунку на ЕОМ температурних полів в дефектних структурах, яка призначена для розв'язання двовірних задач теплопровідності в багатозв'язаних областях складної конфігурації. При цьому передбачена можливість розв'язання стаціонарних та нестаціонарних задач в лінійній та нелінійній постановці. Для розв'язання нелінійних стаціонарних задач використаний ітераційний алгоритм, нестаціонарних - безітераційний.

Для проведення експериментальних досліджень були використані зразки з вуглепластиків типу КМУ-1, КМУ-2Л, КМУ-4 та бороалюмінію ВКА-1.

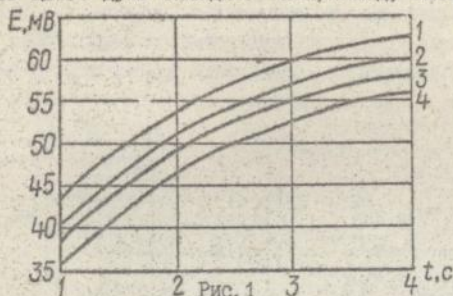
Автором був досліджений "відносний" метод контролю, механізм якого полягає в вимірюванні спочатку температурного відгуку на поверхні еталонного зразку, а потім - на поверхні об'єкту, що контролюється. Кінцевий результат діагностування отримують шляхом порівняння двох попередніх.

Був досліджений вплив параметрів дефектів та температури теплового зонду на чутливість методу. Для вуглепластиків мінімальний дефект, що може бути виявлений при температурі теплового зонду $T = 60^\circ\text{C}$ має розміри глибина залягання $h = 0.5$ мм, розкриття $\delta = 0.5$ мм, характерна довжина $S = 3-4$ мм.

Досліджено вплив нерівномірності теплового поля поверхні зонду та флуктуації ТФХ об'єкту на результати контролю. Відхилення значення коефіцієнту теплопровідності матеріалу об'єкту на 10-20% викликає зменшення електричного сигналу тепломіра на 7-8 мВ, що може бути інтерпретоване як дефект внутрішньої структури (Рис. 1).

Аналіз результатів досліджень показує, що ефективність "відносного" методу залежить від ідентичності умов контролю для еталону та виробу. При реальних умовах експлуатації авіаційної техніки

додержуватись цього дуже складно. Наприклад, зміна ТФХ КМ, яка не є



Вплив зміни ТФХ вуглепластика КМУ-1 на розвиток сигналу тепломіра. 1 - $\lambda = 0,52$ Вт/мК; 2 - $\lambda_{(-10\%)} = 0,468$ Вт/мК; 3 - $\lambda_{(-15\%)} = 0,442$ Вт/мК; 4 - $\lambda_{(-20\%)} = 0,416$ Вт/мК.

дефектом внутрішньої структури, може досягати 30%. Ось чому використання "відносного" методу обмежено.

З метою підвищення ефективності контактних методів діагностування, автором запропоновано "абсолютний" метод, який виключає використання еталонного зразка. Висновки про наявність дефекту у цьому випадку робляться тільки за результатами вимірювання температурного відгуку на поверхні об'єкту. Метод реалізується за допомогою багателементного теплового зонду, що складається з декількох, не зв'язаних між собою чутливих елементів.

Оцінка якості ділянки виробу, що контролюється, виконується за величиною відношення електричного сигналу i -го елемента до еталонного сигналу:

$$D_i = \frac{\sqrt{\frac{\lambda_{\theta} C_{\theta} \rho_{\theta}}{\lambda_{ui} C_{ui} \rho_{ui}}} + 1}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{\lambda_{\theta} C_{\theta} \rho_{\theta}}{\lambda_{ui} C_{ui} \rho_{ui}}} + 1} \quad (4)$$

де λ_{ui} , C_{ui} , ρ_{ui} - ТФХ ділянки виробу, що знаходиться в зоні дії i -го чутливого елемента; λ_{θ} , C_{θ} , ρ_{θ} - ТФХ чутливих елементів.

Запропонований метод було досліджено на імітаційній моделі для дво- та трьохелементного теплового зонду. Розглянуто вплив розмірів дефектів на величину електричного сигналу кожного з чутливих елементів.

Показано, що дефект, розташований у зоні дії одного з чутливих елементів, не впливає на рівень електричного сигналу сусіднього елемента і цей сигнал може бути прийнятий за еталонний.

Підтверджена ефективність виявлення дефектів у КМ, незалежно від їх розташування відносно чутливих елементів (рис. 2).

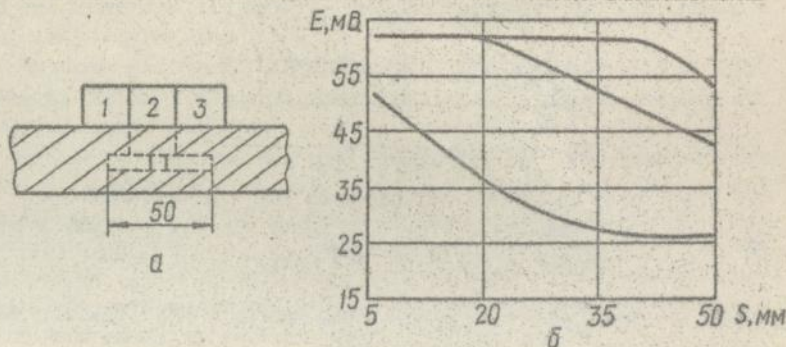


Рис. 2

Відносно розташування дефекту у вуглепластику КМУ-2Л та 3-х елементного зонду (а) і теоретичні залежності ЕРС елементів від параметру S .

У третьому розділі приведені методи визначення параметрів дефектів у КМ, засновані на рішенні зворотної задачі теплопровідності.

Запропоновано рішення зворотної задачі (33) теплового неруливого контролю з використанням алгоритму багатовимірної апроксимації.

Об'єкт контролю це пластина M_1 з неоднорідністю M_2 , яка має відмінні від основного матеріалу ТФХ (рис. 3). Процес нагрівання описується двовірним нестационарним рівнянням теплопровідності (1) всередині областей M_1 та M_2 .

На межах областей M та M має місце умова термічного спряження. На поверхню $y = y_3$ впливає джерело нагріву. На поверхні $X = 0, X = X_3, y = 0$ має місце теплособмін з навколишнім середовищем по закону Ньютона. У початковий момент часу температура пластини дорівнює температурі навколишнього середовища.

Для розв'язання зворотної задачі введемо функціонал:

$$F(h, \delta, s) = \frac{1}{J} \sum_{i=1}^J \frac{T_i - u(t_i, x, y_3)}{u(t_i, x, y_3)}; \quad (h, \delta, s) \in W, \quad (5)$$

де $U(t_i, x, y_3)$ - рішення задачі (1) з характеристиками дефекту (h, δ, S); j - кількість вимірювань; i - номер вимірювання; W - область змінення h, δ, S ; T - температура, що отримана шляхом вимірювання на поверхні $y = y_3$ у момент часу t_i .

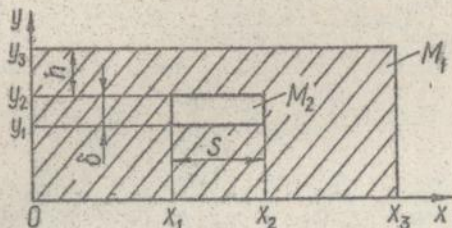


Рис. 3

Переріз пластини з дефектом

Розглядається задача отримання аналітичного виразу таблично заданої багатовимірної залежності температурного контрасту $T = F(h, \delta, S)$ (K значень h , Ω значень δ , R значень S , $h = K\Omega R$ значень T) при заданій допустимій похибці апроксимації. Оскільки структури мінімальної складності. Аналітичний вираз нелінійної залежності отримується шляхом визначення частних регресій по кожній змінній та наступною їх композицією.

Як апроксимуючі функції розглядаються поліноми Чебишева та ступеневі поліноми з від'ємними ступенями. Структура апроксимуючих функцій вибирається шляхом перебору різних структур виду

$$G = \sum_{i=1}^p a_i h^i, \quad (6)$$

де ступені змінної отримані шляхом перебору усіх можливих сполучень по p з наступних $2p+1$ заданих значень ступеню змінної h : $-p, -p+1, \dots, p-1, 0, 1, \dots, p-1, p$.

Оскільки функція температурного контрасту залежить від трьох параметрів h, δ, S , то процес апроксимації складається з трьох кроків:

1. Фіксуючи значення змінних δ і S , отримуємо ΩR одномірних залежностей, що апроксимуються однією з C_{2p+1}^p структур виду (6). Вибирається така структура, яка при апроксимації усіх одномірних залежностей дає максимальну сумарну похибку.

Нехай

$$T = \sum_{i=1}^p c_{-i} h^{-i} + \sum_{i=0}^p c_i h^i. \quad (7)$$

Очевидно, що коефіцієнти апроксимації C_{-i} , C_i , $i \in \overline{0, p}$ є функціями δ , S тобто $C = C(\delta, S)$. Як результат одержим \mathcal{RR} значень для кожного C_{-i} , C_i , $i \in \overline{0, p}$.

2. Фіксуємо значення змінної S , знаходимо апроксимуючі функції для набору значень кожного коефіцієнту, $C_{-i\omega r}$, $C_{i\omega r}$ ($i \in \overline{0, p}; \omega \in \overline{1, \varrho}; r \in \overline{1, R}$) за змінною δ :

$$C_{-i\omega r} = \sum_{j=1}^p a_{-i-j} \delta^{-j} + \sum_{j=0}^p a_{-ij} \delta^j \quad (8)$$

$$C_{i\omega r} = \sum_{j=1}^p a_{-i-j} \delta^{-j} + \sum_{j=0}^p a_{ij} \delta^j.$$

Підставляючи вирази (8) в (7) отримуємо

$$T = \sum_{i=1}^p h^{-i} \left(\sum_{j=1}^p a_{-i-j} \delta^{-j} + \sum_{j=0}^p a_{-ij} \delta^j \right) + \sum_{i=0}^p \left(a_{i-j} \delta^{-j} + \sum_{j=0}^p a_{ij} \delta^j \right). \quad (9)$$

3. Знаходимо апроксимуючі функції для набору значень кожного коефіцієнту a_{-i-jr} , a_{-ijr} , a_{ijr} , a_{ijr} ($r \in \overline{1, R}$) за змінною S .

З метою спрощення виразу (9) визначимо незначимі коефіцієнти, які можна відкинути, якщо буде виконуватися вимога завданої точності апроксимації. Точність апроксимації визначається у вигляді

$$\Delta = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{\varepsilon_i}{NT}}; \quad \varepsilon_i = T_{i\text{зад}} - T_{i\text{роз}}; \quad T = \sum_{i=1}^N T_{i\text{зад}}, \quad (10)$$

де N - число точок, $T_{i\text{зад}}$ - вихідні значення функції, $T_{i\text{роз}}$ - обчислені значення, що отримані з рівняння апроксимації... В результаті отримуємо спрощену модель, похибка апроксимації якої не перевищує допустимої.

На основі одержаної багатомірної функції формується критерій (5), оптимізувати який можна методом прямого пошуку екстремума, наприклад Хука - Дживса.

Викладена методика використовувалась при ідентифікації параметрів дефектів прямокутної форми у пластині з вуглепластика КМУ-4. Похибка визначення параметрів дефектів була у межах 12%.

Іншим шляхом до рішення ЗЗ АТНК є побудова на першому етапі математичної моделі температурного контрасту, факторами якої є характеристики дефекту.

Запропонована методика визначення параметрів дефектів, заснована на використанні двоступеневої процедури оптимізації. Математична модель залежності температурного перепаду від векторів параметрів дефекту $\eta = (h, \delta, S)^T$ (T - знак транспонування) у фіксованій точці на поверхні пластини (рис. 3) можна представити у вигляді:

$$\Delta T = \sum_{i=0}^{\kappa} b_i f_{iu}(\eta) + \varepsilon. \quad (11)$$

Передбачається, що випадкове збурення ε задовольняє вимоги класичного регресійного аналізу.

Значення $\Delta T(t)$ при різних параметрах дефекту можна отримати або як результат чисельного рішення прямої задачі, або, що значно важче, експериментально. Оцінки вектора β були одержані методом найменших квадратів (МНК):

$$\beta = (F^T F)^{-1} F \Delta T, \quad (12)$$

де $\Delta T = (\Delta T_1, \dots, \Delta T_N)^T$, $\beta = (\beta_0, \dots, \beta_\kappa)^T$, $F = [N \times (\kappa + 1)]$ - мірна матриця, "-1" - знак перетворення матриці. Змінюючи параметри контролю побудуємо p моделей виду:

$$\Delta T^j = f^T(\eta) \beta^j, \quad j = \overline{1, p}. \quad (13)$$

На основі попередньо отриманих значень координат векторів β^j ($j = \overline{1, p}$) формується матриця B і після цього АТНК може бути використаний для визначення параметрів дефектів у КМ. З цією метою для елемента конструкції, зробленого з того ж КМ визначається ΔT при умовах аналогічних побудові моделей (13). Потім виконується оцінювання вектору параметрів η процесу

$$\Delta T = B f(\eta) + \varepsilon, \quad (14)$$

де $\Delta T = (\Delta T_1, \dots, \Delta T_p)^T$, $B = [p \times (\kappa + 1)]$ - мірна матриця, елементами якої є оцінки коефіцієнтів математичної моделі виду (13).

Тоді оцінки вектора параметрів визначаються згідно виразу:

$$\hat{\eta} = \begin{bmatrix} \hat{h} \\ \hat{\delta} \\ \hat{S} \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T \Delta T. \quad (15)$$

Модель (14) є нелінійною за координатами вектора параметрів η , але лінійною відносно вектору $f(\eta)$.

Через складність моделей виду (11) матриця $A = B^T B$ може мати достатньо високу розмірність. Крім того, практично неможливо вибрати параметри АТНК, які б забезпечували лінійну незалежність моделей (11).

Одним з шляхів подолання фактору великої розмірності інформаційної матриці є розбивка (сепарація) області M_1 та M_2 на під-області M_j ($j = \overline{1, l}$), для кожної з котрих має матична модель (11) лінійна та має вигляд:

$$\Delta T = \beta_{0j} + \beta_{1j} h + \beta_{2j} S + \beta_{3j} \delta, \quad j = \overline{1, l}. \quad (16)$$

Як результат отримаємо l лінійних моделей.

Отримані оцінки невідомих параметрів, отримані за МНК, можуть бути нестійкі та дуже великі. Для стабілізації оцінок, що отримуються доцільно використовувати метод регуляризації. Тоді оцінки визначаються виразом:

$$\hat{\eta} = (B^T B + rI)^{-1} B^T \Delta T, \quad (17)$$

де r - параметрами регуляризації.

У випадку, коли мінімізуемый функціонал має декілька локальних екстремумів покращення оцінок параметрів дефектів можна досягти за рахунок застосування прямих оптимізаційних методів, наприклад, Хука-Дживса (метод конфігурацій). Як початкові значення для цього методу використовують оцінки МНК або МНК з регуляризацією.

Запропонований підхід був досліджений на зразках з вуглепластиків. Дефект мав вигляд порожнини прямокутної форми. Параметри дефекту змінювались в діапазоні $\delta = 1-3$ мм, $S = 2-8$ мм, $h = 1-6$ мм. Похибка визначення параметрів була в межах 1...20%.

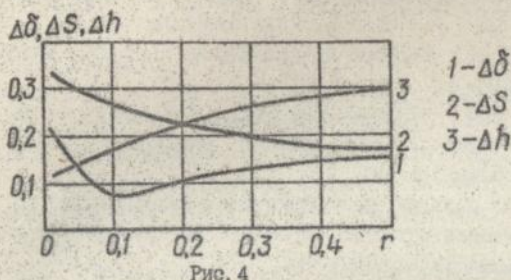
Дослідження похибки проводились методом чисельного моделювання з використанням моделі АТНК шляхом заміни експериментальних реалізацій розрахунковими з відомими параметрами.

Це обумовлено певними складнощами моделювання реальних дефектів з необхідним діапазоном та дискретністю змінення їх параметрів. Описаний підхід спростив дослідження та скоротив час на їх проведення, не впливаючи при цьому на загальність результатів.

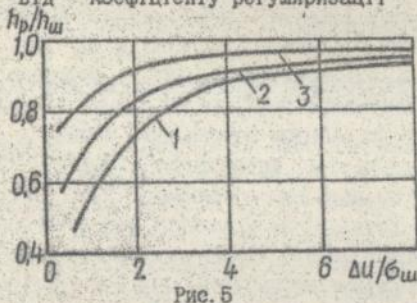
Встановлено, що значення коефіцієнту регуляризації у різних мірі впливає на похибку визначення кожного з параметрів. Існує оптимальне його значення, яке дозволяє максимально наблизити усі три параметри до дійсних значень (рис. 4).

Досліджено вплив глибини залегання дефекта, його розкриття та співвідношення сигнал/шум (рис. 5) на величину похибки визначення па-

параметрів $\Delta\delta, \Delta S, \Delta h$. Показано, що при співвідношенні $\Delta U/\sigma_{ш} > 3$ (ΔU - електричний сигнал, викликаний перепадом температур, $\sigma_{ш}$ - параметр характеризуючий розподіл електричного шуму) впливом шумів можна знехувати.



Залежність похибки визначення параметрів дефекту від коефіцієнту регуляризації



Залежність похибки визначення глибини залегання дефекту (h_p/h_w) від співвідношення сигнал/шум ($\Delta U/\sigma_w$):
 1 - $h = 1$ мм, 2 - $h = 3$ мм, 3 - $h = 5$ мм.

Запропонована методика дозволяє підвищити точність визначення геометричних параметрів дефектів у КМ, вона достатньо ефективна та може бути легко реалізована у апаратурі.

У четвертому розділі запропонована функціональна схема теплового дефектоскопу з багатоселементним тепловим зондом, яка реалізує розроблені методи виявлення у КМ дефектів та визначення їх параметрів.

Приведена методика метрологічної атестації дефектоскопу, яка полягала в сто-кратному контролі спеціальних тест-об'єктів з еталонними дефектами та наступній статистичній обробці результатів з метою

розрахунку вірогідності виявлення дефектів та похибки визначення їх розмірів. Обробка результатів показала, що дефекти виявляються з вірогідністю $P=0,95$. Розміри мінімального дефекту, що являє собою повітряну порожнину в матеріалі, такі: для вуглепластиків $h = 0,38$ мм, $S = 2,2$ мм, $\delta = 0,44$ мм; для борсаломінію $h = 0,51$ мм, $S = 5,0$ мм, $\delta = 0,58$ мм. Похибки визначення параметрів дефектів такі: $\Delta h = -9 \dots 10,5\%$; $\Delta S = 10 \dots 11,5\%$; $\Delta \delta = 13 \dots 15\%$

Таким чином, підтверджена можливість застосування розробленого теплового дефектоскопу для контролю елементів конструкцій авіаційної техніки, вироблених з КМ.

У розділі розглянуто використання запропонованого дефектоскопу для діагностування натурних виробів - ущільнювальних кілець компресора авіадвигунів при їх відновленні.

4. ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. На основі аналізу сучасного стану методів та засобів АТНК показана необхідність їх подальшого розвитку шляхом більш глибоких теоретичних та експериментальних досліджень, розробки нових, більш ефективних методів виявлення дефектів та оцінки їх розмірів. Визначені основні підходи до рішення поставлених задач.

2. На основі двомірної математичної моделі АТНК розроблена імітаційна модель, що враховує особливості КМ, проведені теоретичні та експериментальні дослідження контактних методів контролю.

3. Розроблений новий спосіб визначення геометричних характеристик дефектів, який ґрунтується на побудові сім'ї регресійних моделей при різних параметрах АТНК. Спосіб захищений авторським свідоцтвом на винахід.

4. Запропонована методика підвищення точності оцінювання розмірів дефектів, що використовує для початкового наближення метод найменших квадратів (МНК) і МНК з регуляризацією, а для наступного покращення оцінок - метод конфігурацій. Похибка визначення параметрів дефектів не перевищує 20% для температурного розрізнення 0,2К.

5. Розроблений тепловий дефектоскоп, що реалізує контактний метод за допомогою багатоелементного теплового зонду. Дефектоскоп захищений позитивним рішенням по заявці на винахід.

6. Розроблений блок регулювання температури теплового зонду дефектоскопу, що включає пристрій вимірювання швидкості зміни температури та зміни її другої похідної. Пристрої захищені 4-ма авторськими свідоцтвами.

7. Розроблена методика метрологічної атестації теплового дефек-

тоскопу, що основана на імітації реальних несучільностей з необхідною точністю в довільному матеріалі.

8. Розроблені засоби та методики теплового неруйнівного контролю виробів з КМ, а також наукові результати дисертаційної роботи, використані на виробництві та в науково - дослідних роботах підприємств.

Б ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ

1. Синеглазов В. М., Протасов А. Г., Кеткович А. А. Активная тепловая интроскопия. - Киев, "Техника", 1993. -167 с.
2. Синеглазов В. М., Протасов А. Г. Определение теплофизических характеристик в задачах активного теплового неразрушающего контроля. Техническая диагностика и неразрушающий контроль. -1990. - N2. -С. 73-77.
3. Протасов А. Г., Синеглазов В. М. Определение геометрических параметров дефектов тепловыми методами контроля. Техническая диагностика и неразрушающий контроль. - 1991, N2, с. 30-33.
4. Синеглазов В. М., Протасов А. Г. Повышение точности оценивания геометрических параметров дефектов тепловыми методами контроля. Техническая диагностика и неразрушающий контроль. - 1992, N2, с. 3-7.
5. Синеглазов В. М., Протасов А. Г. Использование многомерной аппроксимации для определения параметров дефектов тепловыми методами. Дефектоскопия. -1993, N 10, с. 76-80.
6. Протасов А. Г. Расчет полей температуры и термоупругих напряжений при сушке уплотнительных колец. - Самолетостроение. Техника воздушного флота. Выпуск 56. - 1989, с. 73-78.
7. Протасов А. Г., Синеглазов В. М. Методика контроля качества уплотнительных колец при их восстановлении. Перспективные методы восстановления деталей и узлов авиационной техники. Сб. научн. тр. - Киев.: КИИГА. - 1989, с. 33-36.
8. Протасов А. Г., Синеглазов В. М., Цедик В. И. Теплометрический дефектоскоп. Положит. решение от 27.07.92 г. по заявке N5017519/25 от 15.07.91.; МКИ G 01 N25/72.
9. А. с. N1643954 СССР МКИ G01 K7/00 Устройство для измерения скорости изменения температуры / Протасов А. Г., Синеглазов В. М., Цедик В. И. //1991. - Бюл. N15.
10. А. с. N 1774725 СССР МКИ G 01 N 25/72. Способ активного теплового контроля дефектов. Синеглазов В. М., Протасов А. Г., Шемет В. Ф. 1992.
11. Протасов А. Г. Система контроля температурного профиля уплотни-

гельних колец при ремонте авиадвигателей. Сб. Тезисы докладов Всесоюзной научно-технической конференции "Состояние метрологического обеспечения разработки, испытания и ремонта авиатехники". - Москва. - 1987.

АННОТАЦИЯ

Протасов Анатолий Георгиевич. Развитие методов активной тепловой дефектоскопии элементов конструкций авиационной техники.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальностям 05.22.14: "Эксплуатация воздушного транспорта" и 05.11.13: "Приборы и методы контроля и защиты окружающей среды, веществ, материалов и изделий. :- КМУТА. 1995.

В работе рассмотрены вопросы диагностирования активными тепловыми методами композиционных материалов, используемых в авиационной технике. В результате проведенных исследований достигнуто повышение эффективности контроля элементов конструкций летательных аппаратов. Погрешность определения геометрических размеров дефектов составила 10...20%.

ANNOTATION

Protasov Anatoliy Georgievich. The development of the methods of active thermal defectoscopy of the aviation equipment construction elements. Thesis for scientific degree of candidate of the technical sciences.

Specialities 05.22.14: "Exploitation of air transport"; and 05 11.13: "Instruments and method of testing and protection of the environment, substanse, materials and goods" KIUCA, 1995.

This paper describes questions of diagnosis of the compositional materials, which had being used in the aviational technique, by using an active thermal methods.

As result of scientific researches the increasing of control efficiency of the construction elements of flying apparatus was achieved. The error in determination of geometrical measurements of defects make up 10...20 %

Ключевые слова: композиционные материалы, активный тепловой контроль, параметры дефектов.



Подписано в печать 11.07.95. Формат 60x84/16. Бумага типогр.
Офсетная печать. Усл.кр.-сетт.б. Уч.-изд.л.1,0. Усл.-печ.л.0,98.
Заказ № 143-1. Цена Изд. № 250/Ш. Тираж 100 экз.

Издательство ЮМГА,
252058, проспект Космонавта Комарова, 1.

AB 32.841