

УДК 621.45.03-2:620.22-419:620.1

doi: 10.32620/aktt.2021.4sup1.14

В. О. ПАЛЬЧИКОВСЬКИЙ, А. В. МОРОЗОВ, Ю. І. ТОРБА

ДП «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна

## МЕТОДИ ДІАГНОСТУВАННЯ ДЕФЕКТІВ ДЕТАЛЕЙ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ З КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Пріоритетним напрямком підвищення техніко-економічних показників газотурбінних двигунів є застосування нових композиційних матеріалів. Використання композитів у елементах відповідальних силових конструкцій, які працюють в умовах статичних та динамічних навантажень протягом тривалих термінів експлуатації, визначає необхідність прогнозування ресурсу цих елементів. Також для підвищення безпеки експлуатації двигунів та вдосконалення технології виробництва деталей, є важливим вчасна діагностика дефектів таких конструкцій. Ця стаття присвячена діагностиці дефектів і пошкоджень деталей з композиційних матеріалів, які виникають на різних етапах виробництва та експлуатації. Метою є розгляд існуючих методів неруйнівного контролю композиційних матеріалів, опис принципу їх роботи і визначення сфери їх застосування. В статті розглядаються акустичні, теплові, оптичні та радіаційні методи контролю. З ряду акустичних методів, метод фазованих решіток, виділений як найбільш інформативний і універсальний. Також виділено метод акустичної емісії, який дозволяє стежити за розвитком дефектів в реальному часі при випробуваннях. З теплових методів виділено метод вібро-термографії, як найбільш перспективний з термографічних підвидів. Він дозволяє використовувати явище локального резонансу дефектів і як наслідок ефективно їх виявляти. З оптичних методів розглянута шерографія. Розглянуто особливості використання рентгенівських методів на прикладі комп'ютерної томографії. Зроблено висновок, що підхід з використанням декількох методів дозволяє значно збільшити ефективність виявлення дефектів і оцінити ступінь їх критичності. Активний тепловий контроль добре підходить для швидкого сканування великогабаритних деталей і пошуку зон скупчення дефектів. Надалі потрібно використовувати локальні методи, як, імпедансний, вібро-термографію або один з ультразвукових. Для вимірювання деформацій при статичному навантаженні доцільно використовувати шерографію. Для виявлення прогресуючих дефектів при статичному навантаженні доцільно використовувати метод акустичної емісії.

**Ключові слова:** неруйнівний контроль композиційних матеріалів; локальний метод вільних коливань; локальний метод вимушених коливань; імпедансний метод; фазовані решітки; акустична емісія; активний тепловий контроль; вібро-термографія; шерографія; комп'ютерна томографія.

### Вступ

Зростаючий попит на використання композиційних матеріалів (КМ) в конструкції авіаційних газотурбінних двигунів (АГТД) обумовлюється тим, що порівняно з металевими сплавами маса окремих деталей знижується на 10...50 %; довговічність вузлів збільшується на 5...25 %; економічність двигунів збільшується на 3...8 % [1].

Так, наприклад, використання безбандажних широкохордних лопаток вентилятора із КМ дозволяє: збільшити аеродинамічну ефективність вентилятора, збільшити витрати повітря через вентилятор, збільшити стійкість двигуна до влучання сторонніми предметами, зменшити рівень шуму, зменшити кількість лопаток вентилятора і його масу. Комплексно це призводить до зменшення навантаження на диск та вал і дозволяє суттєво зменшити ударний вплив на корпус вентилятора у разі обриву лопатки.

Внаслідок цього, в цілому, збільшується надійність, ресурс, тяга та паливна ефективність двигуна.

На сучасному етапі розвитку світові двигунобудівні компанії в конструкції АГТД збільшують частку композиційних матеріалів. Мала питома вага композиційних матеріалів, підвищена питома міцність і жорсткість призводить до низького рівня робочих напружень, що дозволяє вирішити задачу створення відповідальних деталей перспективних авіаційних двигунів з необхідними механічними та температурними властивостями і підвищеною надійністю.

Використання в конструкціях АГТД композитів накладає високі вимоги до призначення ресурсу деталей.

Для визначення обґрунтованої границі витривалості деталей з КМ потрібно провести випробування на втомленість, результати яких здебільшого будуть залежати від своєчасного виявлення пошкоджень на стадії їх виникнення, спостереження за

розвитком пошкоджень та визначенням моменту руйнування матеріалу. Якщо механізм руйнування від втомленості металевих матеріалів досить визначений, то механізм руйнування композиційних матеріалів різних компонентів та структур армування потребує комплексного дослідження.

Таким чином, має актуальність проблема розробки та розвитку науково-обґрунтованих методів визначення дефектів та пошкоджень конструкцій АГТД, виготовлених із композиційних матеріалів, вирішення якої дозволить визначити критерії оцінювання пошкоджень та дефектів виготовлення деталей із КМ перспективних авіаційних двигунів.

## 1. Методи виявлення дефектів та пошкоджень в композитних деталях АГТД

Композиційні матеріали і конструкції з них вимагають застосування спеціальних методів контролю, що істотно відрізняються від контролю металевих матеріалів. При неруйнівному контролі (НК) КМ використовують різноманітні методи, побудовані на взаємодії об'єкту контролю (ОК) та проникаючому випромінюванні – акустичному, тепловому, оптичному, радіаційному.

### 1.1. Акустичні методи

**Акустичний неруйнівний контроль** ґрунтується на реєстрації параметрів акустичних хвиль, що поширюються в об'єкті контролю. Для акустичного контролю застосовують коливання звукового і ультразвукового (УЗ) діапазонів з частотами від 50 Гц до 50 МГц.

Для виявлення дефектів КМ застосовують переважно низькочастотні методи - це обумовлено великим поглинанням і розсіюванням ультразвукових хвиль на високих частотах (причиною цього є велика відмінність хвильових опорів матеріалів армуючих волокон і матриці).

Однак в останні роки почали активно застосовуватися високочастотні методи, які зазвичай використовували при контролі металів. Причина цього - поява нових більш технологічних матеріалів, акустичні властивості яких наближаються до властивостей металів. Також цьому сприяє розвиток засобів і технологій ультразвукового контролю, зокрема збільшення роздільної здатності апаратури і перетворювачів.

З низькочастотних методів НК найбільше поширення в області контролю якості композитів отримали: локальний метод вільних коливань, локальний метод вимушених коливань (резонансний), імпедансний, велосиметричний метод.

З високочастотних методів НК найбільше поширення в області контролю якості композитів отримали: амплітудний тіньовий, часовий тіньовий, ревербераційний, а також ехо-методи.

**Локальний метод вільних коливань** ґрунтується на порушенні вільних коливань (наприклад, шляхом удару) на невеликій ділянці (ОК) і аналізі зміни спектра частот в частині деталі. Метод застосовують для контролю шаруватих конструкцій або вимірювання товщини труб і інших ОК за допомогою впливу короткочасним акустичним імпульсом [2].

**Локальний метод вимушених коливань (резонансний метод)** ґрунтується на збудженні коливань, частоту яких плавно змінюють. Для збудження і прийому УЗ-коливань використовують розподілено-суміщені або роздільні перетворювачі. При збігу частот збудження з власними частотами ОК (навантаженого перетворювачем) в системі виникають резонанси. Зміна товщини призведе до зміщення резонансних частот, поява дефектів - зникнення резонансів (якщо дефект похилий до поверхні виробу) або зміна їх частот (якщо дефект паралельний поверхні).

**Імпедансний метод** заснований на вимірюванні різниці механічного імпедансу або вхідного акустичного імпедансу дефектних і бездефектних ділянок поверхні (ОК). При наявності дефекту або пошкодження відбувається зміна відгуку поверхні (зменшення модуля вхідного механічного імпедансу). Випромінювач збуджує поздовжні гармонійні коливання перетворювача (стержня), ці коливання трансформуються в згинальні коливання ОК і приймач фіксує відгук поверхні (рис. 1). Також може застосовуватися імпульсний варіант методу, заснований на порушенні поздовжніх хвиль в ОК. Зміна механічного імпедансу реєструється перетворювачем (може використовуватися розподілено-суміщений, суміщений або роздільний) імпедансного дефектоскопу (наприклад, ДАМИ-С, ИД91М).

Метод застосовується для НК КМ - виявлення дефектів типу розшарування, непроклеї, порушення цілісності при глибині залягання до 15 мм. Мінімальна площа виявлених дефектів  $\sim 7 \text{ мм}^2$  (залежить від конструкцій перетворювача). Перетворювач має високу чутливість до шорсткості  $R_z$  не повинна перевищувати 30 мкм (в окремих випадках допускається  $R_z$  до 200 мкм) [3, 4].

**Велосиметричний метод** об'єднує способи контролю, що використовують вплив дефекту на швидкість поширення пружних хвиль у ОК і довжину їх шляху між випромінювачем і приймачем коливань. Для цього методу характерно застосування антисиметричних хвиль з частотами 20...60 кГц і сухого точкового контакту перетворювачів з ОК. Дефекти

реєструються за зміною фази безпервної або імпульсної хвилі, або часом поширення акустичного імпульсу.

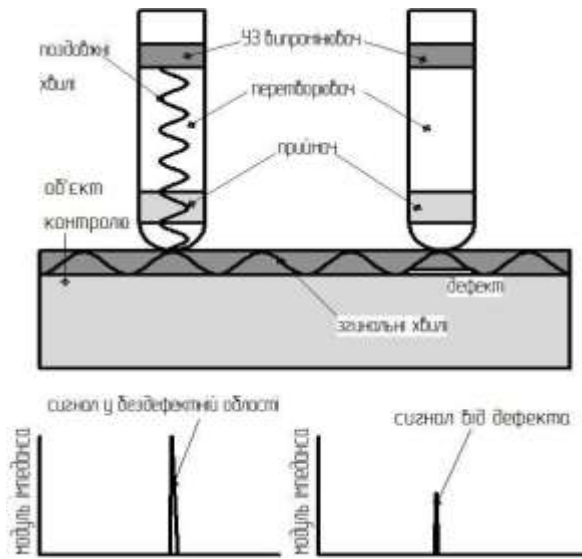


Рис. 1. Схематичне зображення імпедансного методу

Даний метод застосовують для виявлення дефектів (переважно розшарувань) у виробках з шаруватих КМ на глибині до 30 мм (при односторонній реалізації) та до 100 мм (при двосторонній реалізації). Найменша площа виявлення дефектів при цьому становить 0,07...15 см<sup>2</sup>, зі збільшенням глибини залягання дефекту чутливість падає [5].

**Амплітудний тіньовий метод** – це метод, в якому оціночним параметром є амплітуда хвилі, яка пройшла через ОК (наскрізного сигналу). При проходженні сигналу через дефект його амплітуда зменшується (рис. 2).

**Часовий тіньовий метод** - в якому оціночним параметром є час затримки імпульсу, викликаний огинанням дефекту УЗ хвилями (рис. 3).

**Ревербераційний метод** - оціночним параметром є тривалість у часі об'ємної реверберації в ОК (рис. 4).

**Ехо - методи** – оціночний параметр наявності або відсутності імпульсів між зондуємим і донним сигналами, виникнення проміжного імпульсу є ознакою наявності дефекту або пошкодження (рис. 5).

Але найбільш широке застосування для контролю ПКМ отримала технологія фазованих решіток (ФР), що є розвитком ехо-імпульсного методу контролю. Це пояснюється в першу чергу її універсальністю.

Компанія Olympus є одним з лідерів в даній галузі. На рис. 6 наведено приклад використання УЗ дефектоскопу OmniScan MX. Даний прилад дозво-

ляє використовувати, крім методу фазованих решіток, інші (вище розглянуті) методи УЗ контролю [6].

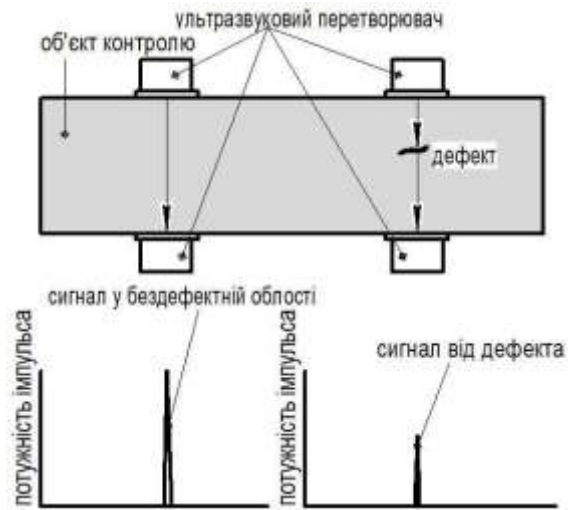


Рис. 2. Схематичне зображення амплітудного тіньового методу

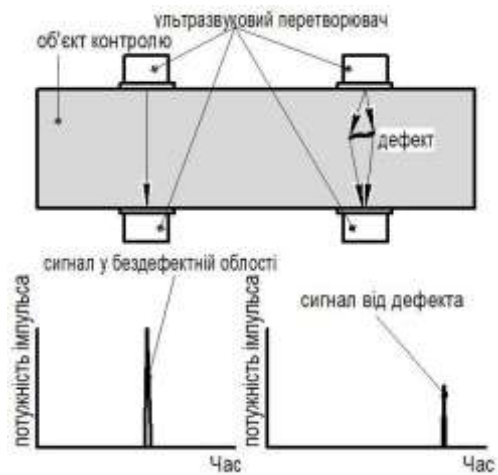


Рис. 3. Схематичне зображення часового тіньового методу

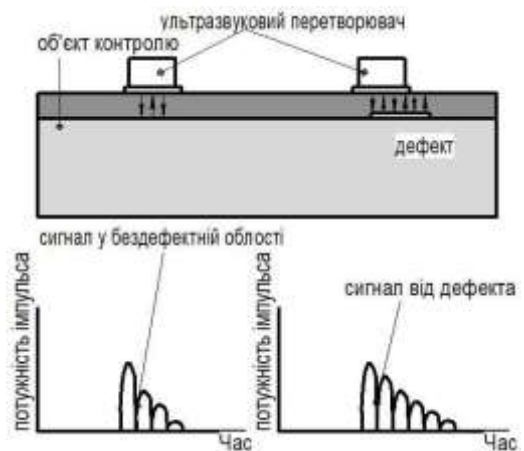


Рис. 4. Схематичне зображення ревербераційного методу

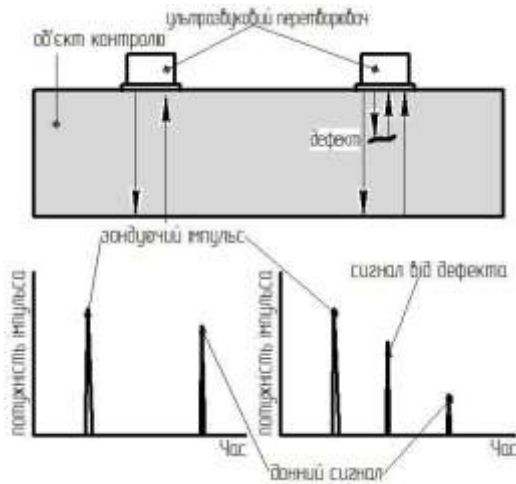


Рис. 5. Схематичне зображення ехо-методів

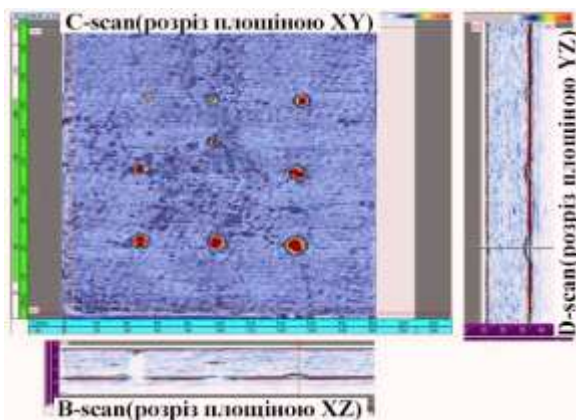


Рис. 6. Приклад використання УЗ дефектоскопу OmniScan MX компанії Olympus для виявлення імітованих дефектів в пластині з КМ

До переваг цього методу можна віднести: високу продуктивність контролю, високу інформативність та достовірність результатів, здатність фокусувати УЗ пучок в будь-яку цікаву для контролю область ОК (рис. 7), багатoelementний перетворювач дозволяє формувати фронт УЗ хвиль і керувати кутом введення УЗ хвилі в матеріал ОК (рис. 8).

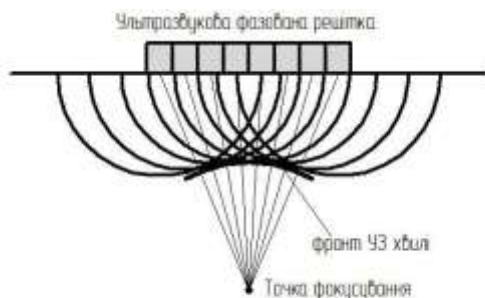


Рис. 7. Принцип формування точки фокусування при використанні методу фазованих решіток

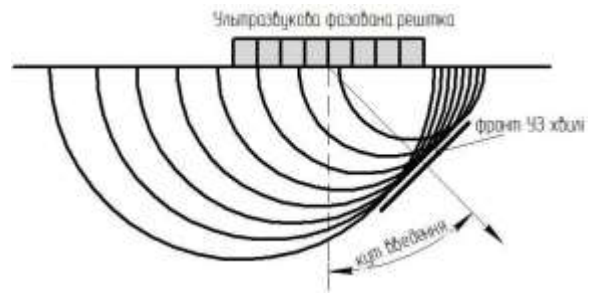


Рис. 8. Принцип формування фронту УЗ хвилі та куту її введення в ОК при використанні методу фазованих решіток

**Лазерно-ультразвуковий метод** являє собою різновид ехо-імпульсного методу, де за допомогою оптико-акустичного генератора реалізується безконтактне введення УЗ хвиль. Використання лазера для генерації УЗ дозволяє скоротити тривалість імпульсу до 6-7 разів порівняно з п'єзо-ультразвуком, що дозволяє суттєво підвищити роздільну здатність [7].

**Акустична емісія (АЕ)** – технічна діагностика, яка ґрунтується на явищі виникнення і поширення пружних коливань (акустичних хвиль) при різних процесах, наприклад, при деформації напруженого матеріалу. ОК підлягають навантаженню силою, тиском, температурним полем і т.д. в результаті чого відбувається випромінювання акустичних хвиль, викликане процесом деформації і руйнування (зростання тріщин), яке реєструється одним або декількома АЕ перетворювачами, розташованими на поверхні ОК.

Особливості методу: встановлені датчики АЕ не вимагають переміщення по поверхні ОК і дозволяють виконувати безперервний контроль всієї деталі в режимі реального часу; ОК треба піддати дії навантажень від зовнішніх джерел; метод є контактним (датчик АЕ встановлюється на поверхню ОК) що може стати перешкодою для застосування; виділення корисних сигналів з сигналу перешкод може бути ускладнене, це пов'язано з випадковою імпульсною природою походження корисного сигналу при утворенні тріщин; має досить високу чутливість до зростаючих (прогресуючих) дефектів.

Метод дозволяє охарактеризувати процес руйнування в непрозорих матеріалах в умовах реальних навантажень та, за наявності концентраторів, визначити місце їх знаходження [8].

## 1.2. Тепловий контроль

В останні роки тепловий контроль (ТК) активно розвивається і все більше використовується при НК КМ.

Термографія - це один з перспективних напрямків НК конструкцій з КМ. В основу цього методу покладено аналіз температурних полів ОК, термографічні камери або тепловізори виявляють випромінювання в інфрачервоному діапазоні електромагнітного спектра (приблизно 0,9...14 мкм) і дозволяють фіксувати зміни температури на рівні 0,01 °С.

У дефектоскопії КМ в основному набули поширення методи термографії, а саме: імпульсний нагрів – на ОК подається короткий енергетичний імпульс; імпульс кінцевої тривалості – на ОК подається імпульс постійної потужності протягом більш тривалого часу; синхронна термографія – на ОК подається періодичний гармонійний модульований імпульс, який дозволяє зміною частоти модуляції регулювати глибину виявлення дефектів (рис. 9). Не вірно підібрані параметри теплового імпульсу можуть призвести до перегріву і руйнування ОК.

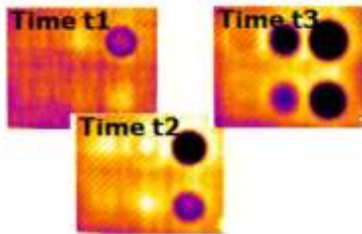


Рис. 9. Приклад використання термографічної системи IrNDT компанії Automation Technology для виявлення імітованих дефектів в пластині з КМ [9]

Застосування активного ТК дозволяє виявити розшарування у КМ, товщиною 0,1...0,2 мм і діаметром більше 1 см<sup>2</sup>, та визначити глибину їх залягання [10].

Методи активного ТК мають високу продуктивність, і добре підходить для дефектоскопії великих об'єктів, наприклад, крил і фюзеляжів літаків або корпусів двигунів.

До методів активного ТК також відноситься вібро-термографія (або ультразвукова інфрачервона термографія) - суть методу полягає в спільному використанні УЗ стимуляції ОК і реєстрації температурного поля поверхні досліджуваного зразка апаратурою інфрачервоної термографії. При цьому ультразвукова енергія перетворюється в тепло шляхом тертя в місцях дефектів (рис. 10) [11].

Особливості методу:

- можливість проведення контролю в реальному часі на площі до 0,25 м<sup>2</sup> навколо точки УЗ стимуляції;

- бездефектні зони практично не нагріваються, дефекти відображаються з високим контрастом в результатуючому зображенні, що дозволяє легко ідентифікувати їх;

- використання явища локального резонансу дефекту дозволяє суттєво підвищити ефективність дефектоскопії.

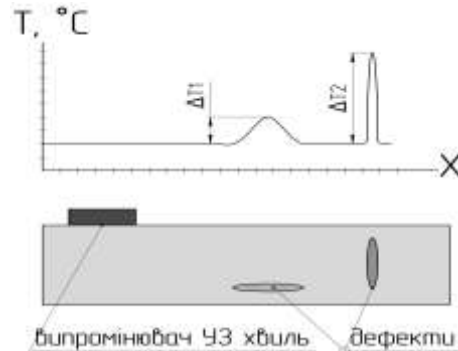


Рис. 10. Умовна схема тепло-генерації на поверхні ОК при вібротермографії (T, °С - температура ОК, ΔT1 і ΔT2 - зміна температурного сигналу в області дефектів)

### 1.3. Оптичні методи контролю

Шерографія - це різновид інтерферометричних методів НК (методів дефектоскопії), за допомогою якого внутрішні руйнування або дефекти ОК можуть бути виявлені за допомогою вимірювання і аналізу поверхневих деформацій. Деформації утворюються як відповідна реакція внутрішньої структури на деяке зовнішнє незначне навантаження (рис. 11). Системи шерографії, мають інтерферометричну чутливість до поверхневих деформацій, що дозволяє виявити субмікронні переміщення поверхні ОК. Таким чином, навіть порівняно невисоке навантаження ОК (наприклад, нагрівання лампою розжарювання протягом 1-2 секунд або тиском повітря в 20-80 мбар) дозволяє виявити дефекти [12].

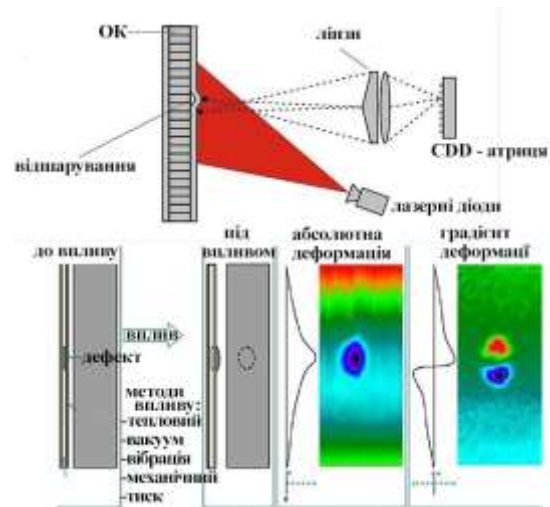


Рис. 11. Основні принципи шерографії

В основному застосовується для безконтактного виявлення розшарувань, тріщин, ударних ушко-

джен. Так само може бути використаний для вимірювання, в реальному часі, деформації конструкції при прикладенні зовнішніх навантажень.

Особливості методу:

- багато в чому залежить від глибини і типу дефекту, матеріалів ОК та зовнішнього впливу на лазер (перевідбиття від поверхні ОК);

- потребує створення бази даних дефектів для вірної оцінки їхньої критичності.

#### 1.4. Радіаційний контроль

Радіаційні методи НК широко застосовуються для виявлення внутрішніх дефектів в різних матеріалах і виробках.

Рентгенівська комп'ютерна томографія є одним із найсучасніших методів НК, що знайшов застосування в області НК КМ. Цей метод дозволяє візуалізувати об'ємну 3D картину внутрішньої структури ОК, що є дуже важливим для КМ, бо вони мають складну й неоднорідну внутрішню структуру; має дуже високу точність, дозволяє виявити пори у матричній компоненті КМ розміром 0,05...0,1 мм [13].

Метод дозволяє виявляти такі дефекти, як розшарування, пошкодження волокон, мікротріщини, пористість, пористості, сторонні включення і зміну товщини.

Має певні обмеження: потребує доступ з усіх сторін ОК, має обмеження по розмірам ОК  $\leq 1000 \times 600$  мм (в залежності від моделі томографа), висуває високі вимоги до безпеки під час експлуатації.

#### Висновки

Особливості ПКМ, такі як їх гетерогенність, анізотропія, залежність акустичних властивостей від процентного вмісту армуючих волокон і зв'язуючого, орієнтація армуючих волокон, пористість, кількість шарів, та інше істотно ускладнюють завдання їх неруйнівного контролю та технічної діагностики, в порівнянні з металами.

Незважаючи на велику різноманітність методів НК КМ – не можна виділити якийсь один як вичерпний, оскільки всі вони мають свої обмеження, пов'язані з: вузькою спрямованістю більшості з них, вищевказаними особливості ПКМ, складністю форм деталей, великою різноманітністю можливих дефектів (що виникають при виробництві та експлуатації).

Акустичні методи здатні чітко виявляти дефекти, але часто виникають серйозні труднощі при визначенні їх розмірів і характеру, що має вирішальне значення для оцінки результатів контролю.

Використання всього одного методу при НК ПКМ є малоінформативним і не завжди ефективним, тому необхідно використовувати комплексний

підхід, комбінуючи різні методи, а також використовувати різні налаштування та режими в рамках одного метода. Це дозволить значно підвищити якість контролю.

#### Література

1. *Инновации при применении композиционных материалов в авиационных двигателях [Текст] / А. С. Новиков, Т. Д. Каримбаев, А. А. Луппов [и др.] // Двигатель. – 2015. – № 2 (98). – С. 6–9.*
2. *Баранова, О. С. Дефектоскопия композитных материалов з застосуванням ударно-акустичного методу неруйнівного контролю [Текст] / О. С. Баранова // Вісник КНУТД. – 2015. – №6 (92). – С. 150–155.*
3. *Мурашов, В. В. Контроль качества авиационных деталей из полимерных композиционных материалов и многослойных клееных конструкций [Текст] / В. В. Мурашов, Е. И. Косарина, А. С. Генералов // Авиационные материалы и технологии. – 2013. – № 3. – С. 65–70.*
4. *Чертищев, В. Ю. Разработка технологий и средств акустического импедансного контроля многослойных сотовых конструкций из полимерных композиционных материалов [Текст] : дисс. ... канд. техн. наук : 05.02.11 : / Чертищев Василий Юрьевич ; Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов. – 2020. – 178 с.*
5. *Мурашов, В. В. Контроль многослойных клееных конструкций низкочастотными акустическими методами [Текст] / В. В. Мурашов, А. С. Генералов // Авиационные материалы и технологии. – 2014. – № 2. – С. 59–66.*
6. *Olympus Corporation [Электронный ресурс] / Olympus Corporation – Режим доступа: <http://www.olympus-ims.com/> – 16.03.2021.*
7. *Каримбаев, Т. Д. Методы неразрушающего контроля деталей авиадвигателей из композиционных материалов. выявление границ допустимости дефектов [Текст] / Т. Д. Каримбаев, Д. С. Пальчиков // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2014. – № 5(47), Ч. 1. – С. 96–105.*
8. *Акустическая эмиссия при испытании композитных материалов [Текст] / С. А. Недосека, А. Я. Недосека, М. А. Шевцова [и др.] // Техн. диагностика и неразруш. Контроль. – 2018. – №4 – С. 36–40.*
9. *AT – Automation Technology GmbH [Электронный ресурс] / AT – Automation Technology GmbH. – Режим доступа: <https://www.automationtechnology.de> – 16.03.2021.*
10. *Диагностика композитных материалов элементов самолетов методом активной термографии [Текст] / Э. Ю. Гордиенко, Н. И. Глушук, Ю. В. Фоменко [и др.] // Наука innov. – 2018. – № 14 (2). – С. 39 – 50.*
11. *Дерусова, Д. А. Тепловой вибротермогра-*

фический контроль композитов с использованием резонансной ультразвуковой и оптической стимуляции [Текст] : дисс. ... канд. техн. наук : 05.11.13 : / Дерусова Дарья Александровна ; Томский политех. ун-т., 2016. – 152 с.

12. Бобко, Ю. А. Применение метода шерографии для дефектоскопии изделий из композиционных материалов [Текст] / Ю. А. Бобко, И. С. Синчугов // В мире НК. – 2016. – Т. 19, № 4. – С. 4–7.

13. Ларин, А. А. Способы оценки работоспособности изделий из композиционных материалов методом компьютерной томографии [Текст] : дисс. ... канд. техн. наук : 05.11.13 : / Ларин Алексей Андреевич; Московская академия рынка труда и инновационных технологий., 2013. – 148 с.

### References

1. Novikov, A. S., Karimbaev, T. D., Luprov, A. A., Afanas'ev, D. V., Mezentsev, M. A. Innovatsii pri primeneniі kompozitsionnykh materialov v aviatsionnykh dvigatelyakh [Innovations in the use of composite materials in aircraft engines]. *Dvigatel'*, 2015, no. 2(98), pp. 6–9.

2. Baranova, O. S. Defektoskopiya kompozytnykh materialiv z zastosuvannyam udarno-akustychnoho metodu neruynivnoho kontrolyu [Defectoscopy of composite materials using the shock-acoustic method of non-jet control]. *Visnyk KNUTD*, 2015, no. 6(92), pp. 150–155.

3. Murashov, V. V., Kosarina, E. I., Generalov, A. S. Kontrol' kachestva aviatsionnykh detalei iz polimernykh kompozitsionnykh materialov i mnogoslainnykh kleenykh konstruksii [Quality control of aircraft parts made of polymer composite materials and multilayer glued structures] *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2013, no. 3, pp. 65–70.

4. Chertishchev, V. Yu. *Razrabotka tekhnologii i sredstv akusticheskogo impedansnogo kontrolya mnogoslainnykh sotovykh konstruksii iz polimernykh kompozitsionnykh materialov*. Diss. kand. tekhn. nauk [Development of technologies and means of acoustic impedance control of multilayer honeycomb structures from polymer composite materials. PhD Diss.]. Moscow, 2020. 178 p.

5. Murashov, V. V., Generalov, A. S. Kontrol' mnogoslainnykh kleenykh konstruksii nizkочастотными акустическими методами [Control of multilayer glued structures by low-frequency acoustic methods]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2014, no. 2, pp. 59–66.

6. Olympus Corporation. Available at: <http://www.olympus-ims.com/> (accessed 16.03.2021).

7. Karimbaev, T. D., Pal'chikov, D. S. Metody nerazrushayushchego kontrolya detalei aviadvigatelei iz kompozitsionnykh materialov. vyyavlenie granits dopustimosti defektov [Methods of non-destructive testing of aircraft engine parts made of composite materials. identification of the boundaries of admissibility of defects]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2014, no. 5(47), pp. 96–105.

8. Nedoseka, S. A., Nedoseka, A. Ya., Shevtsova, M. A., Gur'yanov, A. N., Vambol', A. A. Akusticheskaya emissiya pri ispytanii kompozitnykh materialov [Acoustic emission when testing composite materials]. *Tekhn. diagnostika i nerazrush. kontrol'*, 2018, no. 4, pp. 36–40.

9. AT – Automation Technology GmbH. Available at: <https://www.automationtechnology.de> (accessed 16.03.2021).

10. Gordienko, E. Yu., Glushchuk, N. I., Fomenko, Yu. V., Shustakova, G. V., Dzeshul'skaya, I. I., Ivan'ko, Yu. F. Diagnostika kompozitnykh materialov elementov samoletov metodom aktivnoi termografii [Diagnostics of composite materials of aircraft elements by active thermography]. *Nauka innov.*, 2018, no. 14(2), pp. 39 – 50.

11. Derusova, D. A. *Teplovoi vibrotermograficheskii kontrol' kompozitov s ispol'zovaniem rezonansnoi ul'trazvukovoi i opticheskoi stimulyatsii*. Diss. kand. tekhn. nauk [Thermal vibrothermographic control of composites using resonant ultrasonic and optical stimulation. PhD Diss.]. Tomsk, 2016. 152 p.

12. Bobko, Yu. A., Sinchugov, I. S. Primenenie metoda sherografii dlya defektoskopii izdelii iz kompozitsionnykh materialov [Application of the method of sherography for flaw detection of products made of composite materials]. *V mire NK*, 2016, vol. 19, no. 4, pp. 4–7.

13. Larin, A. A. *Sposoby otsenki rabotosposobnosti izdelii iz kompozitsionnykh materialov metodom komp'yuternoi tomografii*. Diss. kand. tekhn. nauk [Methods for assessing the performance of products made of composite materials by the method of computed tomography. PhD Diss.]. Moscow, 2013. 148 p.

Надійшла до редакції 12.05.2021, розглянута на редколегії 16.08.2021

## МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ДЕФЕКТОВ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

*В. А. Пальчиковский, А. В. Морозов, Ю. И. Торба*

Приоритетным направлением повышения технико-экономических показателей газотурбинных двигателей является применение новых композиционных материалов. Использование композитов в элементах ответственных силовых конструкций, работающих в условиях статических и динамических нагрузок в течение длительных сроков эксплуатации, определяет необходимость прогнозирования ресурса этих элементов. Также для повышения безопасности эксплуатации двигателей и совершенствования технологии производ-

ства деталей, является важным своевременная диагностика дефектов таких конструкций. Эта статья посвящена диагностике дефектов и повреждений деталей из композиционных материалов, возникающих на разных этапах производства и эксплуатации. Целью является рассмотрение существующих методов неразрушающего контроля композиционных материалов, описание принципа их работы и определения сферы их применения. В статье рассматриваются акустические, тепловые, оптические и радиационные методы контроля. Из акустических методов, метод фазированных решеток, выделен как наиболее информативный и универсальный. Также выделен метод акустической эмиссии, который позволит следить за развитием дефектов в реальном времени при испытаниях. Из тепловых методов выделено метод вибро-термографии, как наиболее перспективный из термографических подвидов. Он позволяет, использовать явление локального резонанса дефектов и как следствие эффективно их выявлять. Из оптических методов рассмотрена шерография. Рассмотрены особенности использования рентгеновских методов на примере компьютерной томографии. Сделан вывод, что подход с использованием нескольких методов позволяет значительно увеличить эффективность выявления дефектов и оценить степень их критичности. Активный тепловой контроль хорошо подходит для быстрого сканирования крупногабаритных деталей и поиска зон скопления дефектов. В дальнейшем нужно использовать локальные методы, такие как, импедансный, вибро-термографию или один из ультразвуковых. Для измерения деформаций при статической нагрузке целесообразно использовать шерографию. Для выявления прогрессирующих дефектов при статической нагрузке целесообразно использовать метод акустической эмиссии.

**Ключевые слова:** неразрушающий контроль композиционных материалов; локальный метод свободных колебаний; локальный метод вынужденных колебаний; импедансный метод, фазированные решетки; акустическая эмиссия; активный тепловой контроль; вибро-термография; шерография; компьютерная томография.

#### METHODS FOR DEFECT DETECTION IN AVIATION ENGINE PARTS MADE OF COMPOSITE MATERIALS

*V. Palchykovskiy, A. Morozov, Yu. Torba*

The key priority in improving the technical and economic performance of gas turbine engines lays in the use of new composite materials. The use of composites in the components of critical load-carrying structures operating under static and dynamic loads during long service lives determines the need to predict the component lives. Also, in order to increase the safety of engine operation and improve the parts manufacturing process, timely defect detection in such structures is of great importance. This article is devoted to the detection of the composite parts defects and damages that occur at different stages of manufacturing and operation. The aim is to investigate the existing methods of non-destructive testing of composite materials, describe their functional concept, and determine the field of their application. The article considers acoustic, thermal, optical, and radiation testing methods. Among the acoustic methods, the phased array method is selected as the most informative and multipurpose. The acoustic emission method is also selected; it will allow real-time monitoring of defect growth during testing. Out of thermal methods, the vibrothermography method was selected as the most advanced among the thermographic sub-methods. It allows using the phenomenon of local defect resonance and thus ensures effective defect detection. Shearography is selected for investigation out of optical methods. The special aspects of the use of X-ray methods are considered through the example of X-ray computed tomography. It is concluded that the approach combining several methods can significantly increase the efficiency of defect detecting and help to assess their criticality. Active thermal testing is well suited for fast scanning of large-sized parts and searching for areas of defect accumulation. In the following, local methods, such as impedance, vibrothermography, or one of the ultrasonic, should be used. To measure deformations under static load, it is a good practice to use shearography. To identify progressive defects under static load, it makes sense to use the acoustic emission method.

**Keywords:** non-destructive testing of composite materials; local method of free vibrations; local method of free oscillation testing; impedance method, phased array; acoustic emission; active thermal testing; vibrothermography; shearography; X-ray computed tomography.

**Пальчиковський Володимир Олександрович** – інженер-дослідник, ДП «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна.

**Морозов Андрій Володимирович** – провідний інженер-дослідник, ДП «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна.

**Торба Юрій Іванович** – начальник комплексу, ДП «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна.

**Vladimir Palchykovskiy** – research engineer, SE "Ivchenko-Progres", Zaporozhye, Ukraine, e-mail: Vladimir.phv10@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6376-0491.

**Andrii Morozov** – leading research engineer, SE "Ivchenko-Progres", Zaporozhye, Ukraine, e-mail: avm1478@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9343-6211.

**Yuriy Torba** – head of the complex, SE "Ivchenko-Progres", Zaporozhye, Ukraine, e-mail: TorbaYuI@zmdb.ua, ORCID: 0000-0001-8470-9049.