

УДК 620.179.18

О.В. Радько<sup>1</sup>, О.І. Кремешний<sup>2</sup>, А.К. Скуратовський<sup>3</sup>, Г.Г. Голембієвський<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Національний авіаційний університет, Київ

<sup>2</sup>Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

<sup>3</sup>Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", Київ

## МЕТОДИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ КОНСТРУКЦІЙ ІЗ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

*У статті розглянуті властивості композиційних матеріалів, методи контролю їх стану, а також запропоновані вимоги до нових (модернізованих) систем діагностування та найбільш ефективні методи контролю.*

**Ключові слова:** *неруйнівний контроль, композитні матеріали, властивості матеріалів, акустичні методи, широтографія, нейронні мережі.*

### Вступ

**Стан проблеми.** Сучасне машинобудування вимагає зменшення ваги виробів з одночасним підвищенням їх надійності. Досягненню цієї мети сприяє усе більш широке використання композиційних матеріалів (КМ) у складній та високотехнологічній машинобудівній продукції.

Протягом життєвого циклу виробу з КМ постійно потребують оцінки їх стану: при проектуванні, виробництві, модернізації, використанні та ремонті.

Одним з найбільш ємких у використанні КМ є авіаційне машинобудування.

На сьогодні цивільні авіакомпанії та державна авіація використовують у великій кількості літальні апарати (ЛА) з продовженим терміном експлуатації чи такі ЛА, що експлуатуються за станом.

Основним напрямком збереження працездатності ЛА, які відпрацювали свої граничні терміни експлуатації, за відносно невеликі кошти є їх модернізація, яка обов'язково поєднана з проведенням капітального ремонту. При цьому збільшується потреба у діагностуванні стану ЛА та їх складових і агрегатів в тому числі і виробів з КМ. Така експлуатація ЛА потребує застосування нових більш точних та надійних методів діагностування.

**Мета статті** – проаналізувати структуру та властивості КМ для обґрунтування вибору ефектив-

ного методу контролю стану виробів з КМ під час їх експлуатації.

### Особливості композиційних матеріалів як об'єкта контролю

Забезпечення високої якості та надійності виробів з КМ неможливо без застосування ефективних сучасних методів контролю на всіх стадіях виробничого циклу: проектування, виготовлення, експлуатації. При цьому кожній стадії відповідають свої методи контролю. Найбільш ефективними є методи неруйнівного контролю (МНК) якості, які застосовуються як на стадії виготовлення, так і на стадії експлуатації виробів.

Процеси формування виробів із КМ є досить складними і не піддаються надійному регулюванню, у результаті чого часто спостерігаються істотні зміни властивостей композитів та пов'язана з цим мінливість показників надійності. Крім того, КМ характеризуються істотним розходженням фізичних параметрів матеріалів, що входять до складу композиту, малими значеннями щільності ( $0,02 - 2,0 \text{ г/см}^3$ ) [1], значним розкидом фізичних властивостей як від виробу до виробу, так і в самому виробі, їх анізотропією, відсутністю достатньої інформації про основні типи дефектів. Тому до них не можна застосувати традиційні МНК, які базуються на відомостях про фізичні параметри матеріалів, такі як модуль пружності, гус-

тина, швидкість поширення ультразвукових хвиль, діелектрична проникність, тощо. Більшість видів КМ залежно від використаного виду наповнювача відносяться до діелектриків або погано провідних структур. Практично всі композити є немагнітними матеріалами, тому методи НК, які використовуються при дефектоскопії виробів з металу переважно магнітні й вихрострумові, в більшості випадків не підходять для дефектоскопії виробів з КМ. Не ефективні для контролю композитів також високочастотні ультразвукові (УЗ) методи, так як УЗ хвилі з частотою вище 1МГц неможливо ввести в контрольоване середовище через їх сильне поглинання і розсіювання та суттєвої шорсткості поверхні, або вони значно обмежують діапазон контрольованих значень товщини.

Процес діагностики виробів із композитів додатково ускладнюється тим фактом, що КМ мають широкий спектр можливих дефектів. Існують дефекти, властиві тільки певним композитам, наприклад, неправильний тип волокон, дезорієнтація волокон у просторі, руйнування стільникового заповнювача та інші, а є дефекти, що властиві всім КМ – це сторонні вclusions, розшаровування, пористість, низька міцність зв'язку між наповнювачем і в'язучою речовиною.

### **Вимоги до методів неруйнівного контролю**

На даний час не існує єдиного універсального методу НК КМ, який би дозволяв виявляти всі можливі типи дефектів. При розробці методик і систем діагностики необхідно базуватися на кількох взаємодоповнюючих фізичних методах, які дають можливість визначити найбільшу кількість найбільш небезпечних для КМ і виробу дефектів.

Основні вимоги, що висуваються до НК, полягають у наступному:

- можливість здійснення ефективного контролю на різних стадіях виготовлення, в експлуатації і при ремонті виробів;

- узгодженість часу, що витрачається на контроль, з часом роботи іншого технологічного обладнання;

- висока достовірність результатів контролю;

- можливість механізації і автоматизації контролю технологічних процесів, управління ними з використанням сигналів, що генеруються засобами НК;

- висока надійність дефектоскопічної апаратури і можливість використання її в різних умовах;

- простота методики контролю, технічна доступність засобів контролю в умовах виробництва, ремонту та експлуатації;

- метод і обладнання повинні забезпечувати суцільний контроль всіх виробів, що випускаються.

Вибір того чи іншого МНК визначається наступними чинниками:

- агрегатним станом контрольованого середовища (газоподібний, рідкий, твердий);

- фізичним станом контрольованого середовища (діелектрик, напівпровідник, магнетик, парамагнетик тощо);

- видом структури контрольованого середовища (аморфна, монокристалічна, полікристалічна, неоднорідна, ізотропна тощо);

- здатністю взаємодіяти з робочим випромінюванням (слабке або сильне поглинання, слабке або сильне розсіювання тощо);

- методологією контролю (у вакуумі, при високій температурі, тощо);

- розміром, конфігурацією і конструктивними особливостями об'єкта контролю (ОК) (мало-, великогабаритний, одно- або багатопаровий тощо).

Найважливішими характеристиками технічних можливостей МНК є чутливість і роздільна здатність, достовірність результатів контролю.

Чутливість методу визначається найменшими розмірами дефектів, що виявляються: у поверхневих дефектів – шириною розкриття біля виходу на поверхню, протяжністю в глиб матеріалу і по поверхні деталі; у глибинних дефектів – розмірами дефекту із зазначенням глибини залягання. Порівняльні дані по чутливості деяких МНК наведено в [2].

Роздільна здатність дефектоскопа визначається найменшою відстанню між двома сусідніми мінімальними дефектами, для яких можлива їх роздільна реєстрація. Вимірюється вона в одиницях довжини або числом ліній на 1мм. Передбачається в технічних вимогах на оптичні прилади та радіаційні дефектоскопи. Для УЗ і вихрострумових дефектоскопів може обумовлюватися лише при необхідності, для магнітних методів – не вказується.

Достовірність результатів контролю визначається ймовірністю пропуску деталей з явними дефектами або необгрунтованим бракуванням придатних деталей.

### **Аналіз методів неруйнівного контролю конструкцій із композиційних матеріалів**

Згідно із ГОСТ 18353-79 [3] існує 9 видів НК: магнітний, електричний, вихрострумовий, радіохвильовий, тепловий, оптичний, радіаційний, акустичний (ультразвуковий) і проникаючими речовинами. Згідно із ДСТУ 2865-94 [4], окрім вказаних вище видів НК розрізняють органолептичний, візуальний, електрогазодинамічний і газорозрядну візуалізацію та фотографування у полях високої напруги. Кожний з них поділяється на методи, кількість яких може бути досить значною (наприклад, в акустичному контролі ГОСТ 23829-85 [5] виділяє 16 основних методів, в більш пізніх джерелах згадані вже до 25 методів). Проте, як уже відмічалось раніше, для контролю якості конструкцій із КМ можуть застосовуватися лише деякі з цих методів.

Коротко розглянемо основні МНК, які можуть застосовуватися для контролю якості виробів з КМ.

Візуальні МНК застосовуються не тільки для армованих пластиків. Використання КМ в шаруватих конструкціях також вимагає застосування таких МНК. Візуальний огляд безпосередньо після затвердіння ще не охололих стільникових конструкцій дозволяє виявити бульбашки, непоклеї або розшаровані ділянки.

Електричними методами НК можна визначити вміст компонентів в гетерогенних системах, вологість, ступінь полімеризації і старіння, поперечні розміри лінійно-протяжних діелектричних виробів, локалізацію провідникових і непровідних включень у структурі шаруватого пакета.

Методами теплового контролю можна виявити такі дефекти, як пропуски армуючих ниток в каркасах, порівняно великі сторонні включення. Однак ці методи не дозволяють виявляти дрібні структурні дефекти, так як геометрична роздільна здатність сучасної апаратури складає приблизно 0,5 мм.

Найбільш досконалим з усіх радіаційних методів є метод обчислювальної томографії. На базі томографів створюються промислові установки для контролю та документального відображення внутрішньої структури великогабаритних корпусів ракетних двигунів твердого палива з КМ.

Радіотехнічні методи (радіохвильовий і радіо-

спектроскопічний) широко застосовуються для контролю якості виробів з ПКМ. На практиці найбільшого поширення набули надвисокочастотні методи, що досліджують діапазони довжин хвиль від 1 до 100 мм, що відповідає інтервалу частот від 0,3 до 300 ГГц. Переважна область застосування методів і техніки надчастот – це контроль напівфабрикатів, виробів і конструкцій з КМ, в яких поширюються радіохвилі.

Акустичні методи (АМ) дозволяють контролювати суцільність КМ, якість зварних і клеєних з'єднань. Серед МНК ПКМ та багатшарових клейових конструкцій АМ за обсягом застосування займають перше місце [6]. Точність вимірювань становить від 3 до 8% від еквівалентної або умовної чутливості, що задається еталонними зразками. АМ дуже чутливі до форми контрольованих об'єктів (до сферичних, конічних) невеликих розмірів. Найбільше застосування при контролі якості виробів з КМ знайшли методи УЗ дефектоскопії, які дозволяють виявити розриви армуючих волокон, бульбашки повітря і скупчення смоли при контролі виробів різної форми.

АМ поділяють на дві великі групи (рис. 1): активні, що використовують випромінювання і прийом акустичних хвиль, і пасивні, засновані тільки на прийомі хвиль. У кожній з цих груп можна виділити методи, що досліджують виникнення в об'єкті контролю біжучих і стоячих хвиль.

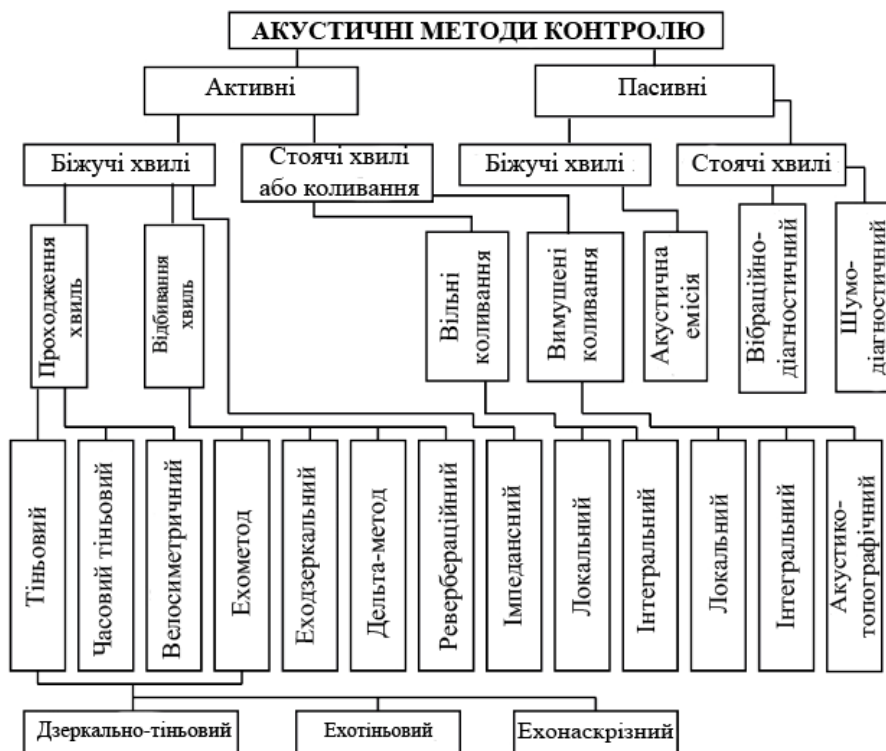


Рис. 1. Класифікація акустичних методів контролю

Прикладом застосування АМ для НК виробів із композитів є діагностика габаритних конструкцій повітряних суден з ПКМ, коли використовуються

роздільні збуджувач та приймач, що з'єднані з дефектоскопом АД-60, а приймач, окрім того, з'єднується із системою комп'ютерної обробки інфор-

мації через інтерфейсну плату ET-1255 [7]. Для отримання інформації при скануванні поверхня конструкції поділена на сектори у вигляді координатної сітки (рис. 2, а) і обрані напрями сканування. Для оцінки чутливості контролю використовували варіанти сканування суміщеним перетворювачем, а також з використанням п'єзоелектричного приймача і приймача мікрофонного типу (рис. 2, б). Із наведених залежностей видно, що максимальна чутливість контролю досягається під час використання п'єзоелектричного перетворювача.

Новим методом НК, який інтенсивно розвивається, є електронна ширографія [8 – 11]. Вона ефективна, коли дефект у контрольованій ділянці об'єкта викликає аномальну деформацію його поверхні за навантаження (під дією нагрівання, розтягування, стискання тощо). Ця аномалія виявляється внаслідок локальної зміни інтерференційної картини смуг і характеризується кривою розподілу похідної  $\partial w/\partial x$  або  $\partial w/\partial y$  ( $w$  – переміщення із площини об'єкта по нормалі до контрольованої поверхні) уздовж обраних перерізів. При цьому екстремуми, які виникають на кривій зміни похідної, вказують на присутність дефектів на контрольованій ділянці об'єкта. Важливою перевагою електронної ширографії є те, що на відміну від традиційних методів, які тільки вказують на присутність або відсутність дефектів, вона дає можливість візуалізувати концентрацію напружень, яка обумовлена дефектом та конструктивними особливостями об'єкта дослідження.

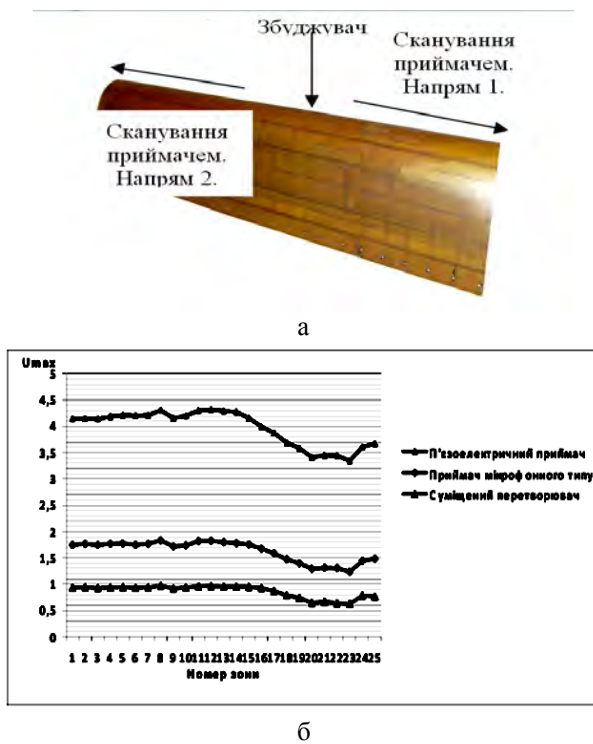


Рис. 2. Фрагмент конструкції крила (на основі склопластику із стільниковим заповнювачем) з координатною сіткою (а) та розподіл максимальної амплітуди сигналу по поверхні конструкції (б)

Суть методу: поверхню ОК частково або повністю освітлюють лазерним світлом. Відбиті від поверхні лазерні промені попадають на широкоеlement, розташований перед об'єктивом CCD-камери. Поле світлових хвиль, відбите від ОК, роздвоюється і фокусується у площині зображення камери із незначним зсувом. Світлові хвилі інтерферують одна з одною, створюючи хаотичну мікроінтерференційну спекл-структуру, яку за допомогою CCD-камери вводять до комп'ютера. Мікроінтерференційні спекл-структури, що записані у двох станах об'єкта (до та після його навантаження), порівнюють і опрацьовують до отримання макроінтерференційних смуг (широграми).

На рис. 3 наведено результати ширографічного контролю склопластикової п'ятишарової панелі. У пам'ять комп'ютера записували початкове зображення поверхні панелі. Потім панель обдували теплим повітрям, нагрітим до температури 50°C з відстані  $\approx 60$  мм впродовж 30 с. На стадії охолодження зображення поверхні також записували у пам'ять комп'ютера і опрацьовували до отримання на моніторі інтерференційних смуг (рис. 3, б). На ділянці локалізованої картини смуг, спричиненої нагрівом, виявлена зона непоклеювання площею 900 мм<sup>2</sup> у шарі біля поверхні. Побудовані тривимірні картини деформування поверхні дослідження і зміна похідної  $\partial w/\partial y$  уздовж перерізу А-А визначають місце дефекту (рис. 3, с, d).

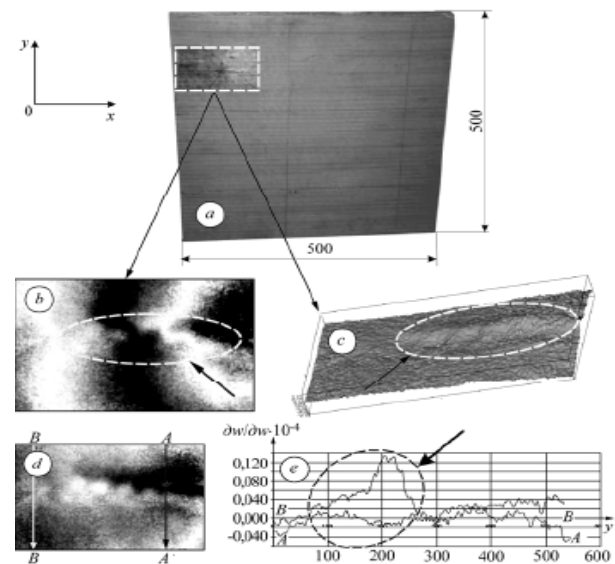


Рис. 3. Результати ширографічного контролю склопластикової п'ятишарової панелі (500 × 500 × 25 мм): а – загальний вигляд; б – картина інтерференційних смуг на досліджуваній ділянці (дефект позначений штриховою лінією та указаний стрілкою); с – тривимірна картина деформування ділянки контролю під впливом теплового навантаження; d – схема досліджуваних перерізів; е – зміна похідної  $\partial w/\partial y$  уздовж обраного перерізу (А-А – переріз на ділянці з дефектом, В-В – переріз на ділянці без дефекту)

Одним з перспективних напрямів безеталонної діагностики композитів вважається створення системи НК та класифікації стану виробів із КМ на основі нейронної мережі адаптивної резонансної теорії [12, 13]. Застосована для цього модифікована нейронна мережа Fuzzy-ART працює за алгоритмом (рис. 4) та виконує класифікацію вхідних даних у кілька етапів.

Дана система дозволяє визначати дефектні ділянки ОК та проводити їх класифікацію за ступенем пошкодженості. Інтерфейс користувача (рис. 5) такого класифікатора у складі системи НК виробів із КМ містить ряд елементів керування: вибір параметрів нормування за інформаційними ознаками дозволяє привести вхідні дані до заданого діапазону значень; вибір матриці вагових коефіцієнтів нейронів мережі дозволяє вибирати матриці вагових коефіцієнтів, що зберігаються у вигляді файлів на фізичному носії даних (жорсткий диск, flash-пам'ять, CD/DVD носії даних тощо). Застосування нейронної мережі Fuzzy-ART для обробки отриманих експериментальних даних дає можливість автоматизувати цей процес та процес прийняття рішень за результатами НК.

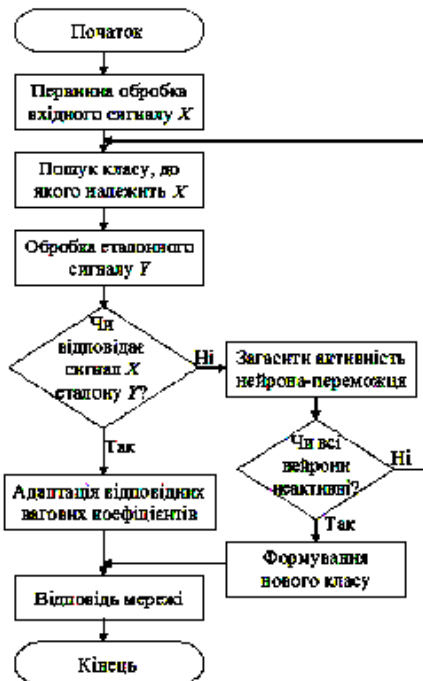


Рис. 4. Алгоритм роботи мережі Fuzzy-ART

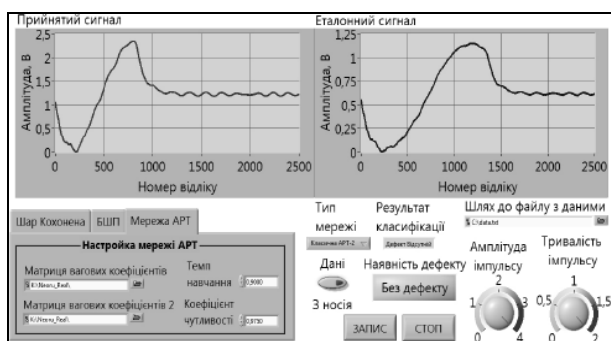


Рис. 5. Інтерфейс користувача класифікатора стану виробів із КМ

Модифікована архітектура нейронної мережі Fuzzy-ART має такі переваги:

- стабільність запам'ятованої інформації;
- можливість динамічно розширювати власну базу знань;
- високу роздільну здатність при класифікації даних;
- добру заводозахисненість;
- інваріантність відносно порядку пред'явлення вхідних даних;
- можливість змінювати швидкість навчання мережі;
- здатність мережі самостійно при повторному пред'явленні навчальної вибірки виправляти помилки, які були допущені на попередньому етапі роботи;
- можливість працювати з аналоговими сигналами.

Достовірність контролю композитних панелей (зі стільниковим заповнювачем типа ІСП-1 і обшивкою на основі склотканини Т42/1-76) методом низькошвидкісного удару із застосуванням класифікатора на основі нейронної мережі Fuzzy-ART у складі системи НК становить 97–98 % [13].

В результаті аналізу та оцінки ефективності існуючих методів НК встановлено, що найбільш ефективними для діагностики КМ є такі: низькочастотний ультразвуковий імпульсний; радіаційний; інфрачервоний оптичний; теплометричний; електричний.

Основні критерії, що обумовлюють вибір даних методів контролю: безпека для обслуговуючого персоналу, чутливість контролю; точність і відтворюваність результатів контролю; можливість механізації і автоматизації контролю; забезпечення високої продуктивності контролю; порівняно проста методика контролю; інформаційна спроможність і універсальність контролю; наявність і можливість використання серійної апаратури; порівняно невисока вартість контролю; можливість виконання контролю персоналом невисокої кваліфікації.

Зазначені методи контролю можна використовувати як індивідуально, так і в комплексі. Слід враховувати, що збільшення кількості використовуваних методів поряд з підвищенням чутливості та інформативності контролю призводить також до підвищення вартості і зниження продуктивності контролю.

## Висновки

1. Досліджено особливості КМ як об'єкта контролю. Встановлено, що КМ характеризуються істотним розходженням фізичних параметрів матеріалів, що входять до складу композиту, малими значеннями щільності, значним розкидом фізичних

властивостей як від виробу до виробу, так і в самому виробі, їх анізотропією, відсутністю достатньої інформації про основні типи дефектів. Більшість видів КМ відносяться до діелектриків або погано провідних структур, практично всі композити є немагнітними матеріалами, тому методи НК, які використовуються при дефектоскопії виробів з металу, в більшості випадків не підходять для дефектоскопії виробів з КМ.

2. Проведено аналіз ефективності методів НК конструкцій із КМ. Визначено, що на даний час не існує єдиного універсального методу НК КМ, який би дозволяв виявляти всі можливі типи дефектів. Встановлено, що найбільш ефективними для діагностики КМ є такі: низькочастотний ультразвуковий імпульсний; радіаційний; інфрачервоний оптичний; теплотричний; електричний.

3. Проведений аналіз дозволить розробляти методики і системи діагностики та вимоги до них, які могли б використовувати декілька взаємодоповнюючих фізичних методи, що дають можливість визначити всі небезпечні для КМ і виробу дефекти. Слід враховувати, що збільшення кількості використовуваних методів поряд з підвищенням чутливості та інформативності контролю призводить також до підвищення вартості і зниження продуктивності контролю.

### Список літератури

1. *Матеріалознавство: підручник / М.В. Кіндрачук, В.Ф. Лабунець, Т.С. Климова, І.Ч. Черниш*. – К.: НАУ, 2012. – 492 с.
2. *Белокур И.П. Дефектоскопия материалов и изделий / Белокур И.П., Коваленко В.А.* – К.: Техника, 1989. – 192 с.
3. *Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов: ГОСТ 18353-79*. – [Чинний від 1980-07-01]. – М.: Изд-во стандартов, 1994. – 12 с.
4. *Контроль неруйнівний. Терміни та визначення: ДСТУ 2865-94*. – [Чинний від 1996-01-01]. – К.: Держстандарт України, 1995. – 52 с. – (Національний стандарт України).

5. *Контроль неразрушающий акустический. Термины и определения: ГОСТ 23829-85* – [Чинний від 1987-01-01]. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 16 с.

6. *Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. Неразрушающий контроль. Справочник в 7 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3: Ультразвуковой контроль*. – М.: Машиностроение, 2004. С. 29-140.

7. *Овсянкін А.М. Акустичний контроль габаритних конструкцій повітряних суден з полімерних композиційних матеріалів / А.М. Овсянкін, В.С. Єременко, Є.Ф. Суслов, В.А. Мотрук // АВИА-2009 : Матеріали 9-ї міжнар. наук.-техн. конф. (Київ, 21-23 вересня 2009 р.)*. –Т.1. – К.:НАУ, 2009 – С. 1.25-1.28.

8. *Лобанов Л.М. Оперативний контроль якості елементів авіаційних конструкцій методом електронної широкорафії / Л.М. Лобанов, С.А. Бичков, В.А. Пивторак, В.Я. Дереча та ін. // Фізико-хімічна механіка матеріалів*. – 2009. – № 3. – С. 37-42.

9. *Rastogi P.K. Trends in Optical Nondestructive Testing and Inspection*. – Amsterdam Lausanne: Elsevier, 2000. – 633 p.

10. *Лобанов Л.М. Методика, технология и аппаратура широкорафического неразрушающего контроля материалов и элементов конструкций / Л.М. Лобанов, В.А. Пивторак, Е.М. Олейник, И.В. Киянец // Техн. диагностика и неразр. контроль*. – 2004. – № 3. – С. 1-4.

11. *Лобанов Л.М. Диагностика элементов и узлов конструкций с применением метода электронной широкорафии / Л.М. Лобанов, В.А. Пивторак, Е.М. Савицкая, И.В. Киянец // Техн. диагностика и неразр. контроль*. – 2008. – № 4. – С. 7-13.

12. *Переїденко А.В. Система кластерного аналізу результатів неруйнівного контролю виробів із композиційних матеріалів / А.В. Переїденко, В.С. Єременко, В.О. Роганьков // Наукові технології*. – 2010. – № 3. – С. 73-77.

13. *Єременко В.С. Класифікатор стану виробів із композиційних матеріалів на основі нейронної мережі адаптивної резонансної теорії / В.С. Єременко, А.В. Переїденко, П.А. Шегедін // Вісник НАУ*. – 2012. – №1 – С. 92-100.

Надійшла до редколегії 12.06.2013

**Рецензент:** канд техн. наук, проф. Ю.І. Миргород, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

### МЕТОДЫ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

О.В. Радько, А.И. Кремешный, А.К. Скуратовский, Г.Г. Голембиевский

*В статье рассмотрены свойства композиционных материалов, методы контроля их состояния, а также предложены требования к новым (модернизированным) системам диагностирования и наиболее эффективные методы контроля.*

**Ключевые слова:** неразрушающий контроль, композитные материалы, свойства материалов, акустические методы, широкорафия, нейронные сети.

### METHODS OF NON-DESTRUCTIVE CONTROL OF CONSTRUCTIONS FROM COMPOSITION MATERIALS

O.V. Rad'ko, A.I. Kremeshnyy, A.K. Skuratovskiy, G.G. Golembievskiy

*Properties of composition materials, methods of control of their state, are considered in the article, and also offered requirement to the new (modernized) systems of diagnosing and the most effective methods of control.*

**Keywords:** non-destructive control, composite materials, properties of materials, acoustic methods, shirohrafy, neuron networks.