

УДК 621.91:678.5

**І.О. Булах**, аспірант

**О.В. Глоба**, канд. техн. наук

НТУУ «КПІ», Механіко-машинобудівний інститут, м. Київ, Україна

### **АНАЛІЗ МЕТОДІВ НЕРУЙНУЮЧОЇ ДЕФЕКТΟΣКОПІЇ ВИРОБІВ З КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ**

**И.А. Булах**, аспирант

**А.В. Глоба**, канд. техн. наук

НТУУ «КПИ», Механико-машиностроительный институт, г. Киев, Украина

### **АНАЛИЗ МЕТОДОВ НЕРАЗРУШАЮЩЕЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**I.O. Bulakh**, post-graduate student

**O.V. Hloba**, Candidate of Technical Sciences

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Institute of Mechanical Engineering, Kyiv, Ukraine

### **THE ANALYSIS OF METHODS OF NON-DESTRUCTIVE FLAW DETECTION OF THE PRODUCTS FROM COMPOSITE MATERIALS**

*Розглянуто методи неруйнуючої дефектоскопії конструкцій з полімерних композиційних матеріалах при їх виготовленні, механічному обробленні та експлуатації. Проаналізований рівень застосовності та інформативності кожного з методів для ПКМ. Особливу увагу сконцентровано на методах дефектоскопії процесів розширення та утворення тріщин у композитах, що значно знижують експлуатаційні характеристики конструкцій.*

**Ключові слова:** неруйнуюча дефектоскопія, полімерні композиційні матеріали, розширення матеріалу.

*Рассмотрены методы неразрушающей дефектоскопии конструкций из полимерных композиционных материалах при их изготовлении, механической обработке и эксплуатации. Проанализирован уровень применимости и информативность каждого из методов для ПКМ. Особое внимание сконцентрировано на методах дефектоскопии процессов расслоения и образования трещин в композитах, которые значительно снижают эксплуатационные характеристики конструкций.*

**Ключевые слова:** неразрушающая дефектоскопия, полимерные композиционные материалы, расслоение, разрушение материала.

*The methods of non-destructive control of polymeric composite materials during their manufacture, machining and maintenance were considered. The level of applicability and the information content of each methods for the PCM was analyzed. The particular attention is focused on methods of controlling the processes of stratification and formation of cracks in the composites what significantly reduce the performance designs.*

**Key words:** non-destructive inspection, polymer composites, delamination, the destruction of the material.

**Постановка проблеми.** Розвиток авіаційної і космічної техніки пов'язаний з розширенням застосування композиційних матеріалів, які мають високі фізико-механічні, теплофізичні, діелектричні характеристики. Проблема діагностики композитних матеріалів по фактичному стану є досить актуальною, оскільки дефекти структури, що виникають при виготовленні та у процесі експлуатації, можуть істотно зменшити міцність матеріалу. Тому особливе значення має розроблення неруйнівних методів діагностики, що дозволяють контролювати не тільки процес виготовлення, а й зміни структури композиту в процесі експлуатації та механічного оброблення виробів. Дефектоскопія шаруватих конструкцій пов'язана в основному з визначенням дефектів технологічного профілю, однак дослідження експлуатаційних дефектів, а також дефектів, що виникають у процесі механічного оброблення, особливо для конструкцій багаторазового використання або тривалого зберігання, також є актуальними. Процеси механічного оброблення у КМ відбуваються не так, як у металах, за рахунок анізотропії композиційних матеріалів. У результаті виникають різного роду дефекти (як геометричних параметрів, так і фізико-хімічного стану матеріалу), які значно знижують якість конструкцій. Тому важливим є розгляд методів неруйнуючого контролю виробів з КМ, а також аналіз рівня застосовності кожного з них.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Щодо неруйнуючого контролю конструкцій з композиційних матеріалів, було запропоновано та розглянуто деякі методи. Зокрема,

А.А. Карабутов [2] розглянув імпульсну акустичну спектроскопію, досліджувалися лазерний оптоакустичний та лазерний ультразвуковий методи [1; 5]. Багато уваги приділено дослідженню поширення акустичних та ультразвукових хвиль у композиційних матеріалах [1-4]. Також розглядалися електромагнітні, теплові методи, метод термопар, імпедансний, велосиметричний методи тощо та межі їх застосовності до виробів з композиційних матеріалів, зокрема для вугле- та склопластиків. Відзначається як перспективний СВЧ-метод контролю мікроструктурних дефектів і механічних властивостей матеріалів на сантиметрових хвилях, запропоновані конструкції СВЧ-дефектоскопа, який дозволяє визначити внутрішні напруги і тріщини в контрольованому виробі.

**Мета статті.** Розглянути наявні методи неруйнуючого контролю конструкцій та застосування цих методів до виробів з композиційних матеріалів. Розкрити перспективи подальшого дослідження та впровадження нових методів контролю КМ.

### **Виклад основного матеріалу.**

#### *Аналіз наявних методів контролю*

У виробі з композиційного матеріалу після намотування у процесі полімеризації через внутрішні напруги, нерівномірного розподілу зв'язуючого та інших технологічних факторів, а також внаслідок механічного оброблення можуть виникати розшарування, рихлоти, тріщини, сколи, прижоги та ін. Нині контроль багат шарових композицій проводиться тіншовим ультразвуковим методом з використанням датчиків, що з'єднані з локальною імерсійною ванною. Проте тіншовий метод контролю не дозволяє визначити глибину залягання дефектів і конкретизувати їх знаходження.

Застосування імпедансного, велосиметричного та інших методів неефективні за великої товщини композиційного матеріалу і низької чутливості. Для визначення тріщин у неметалічних матеріалах у наш час широко використовуються акустичний, ультразвуковий, імпульсний, радіаційний методи і метод, заснований на властивості фотопружності. Істотним недоліком імпульсного методу є проблема забезпечення надійного акустичного контакту випромінювача і приймача в різних місцях виробів, оскільки неоднаковість втрат ультразвукової енергії в контактах призводить до великих похибок. Імпульсний метод чинить помітний вплив на властивості самого КМ.

Радіографічний метод забезпечує визначення концентрації та орієнтації наповнювача, тріщин у смолі, неточності кроку намотування і т. д., але він не знайшов широкого застосування через трудомісткість процесу контролю.

Метод фотопружності покриттів дозволяє виміряти розмір основних деформацій виробу та напрямки деформацій, а також спостерігати місця концентрації напруг і наявності тріщин. Він заснований на зміні поляризації і заломлення світла у фотопружних покриттях, нанесених на поверхню виробу. Застосування методу фотопружних покриттів в умовах виробництва стикається з певними труднощами, обумовленими його нетехнологічністю і трудомісткістю (потрібне нанесення покриття на всю поверхню виробу, потім видалення покриття, контроль повноти видалення, приготування покриття). Крім того, розшифрування результатів контролю представляє також значні труднощі.

Виявлення тріщин у вугле- та склопластикових виробках можливо з використанням емісії хвиль напружень. Недоліком методу є складність апаратури і необхідність навантаження виробів внутрішнім тиском, у результаті чого значно знижується міцність виробу і надійність його роботи при наступних випробуваннях. Відзначається як перспективний СВЧ-метод контролю мікроструктурних дефектів і механічних властивостей матеріалів на сантиметрових хвилях.

#### *Дефектоскопія шаруватих конструкцій*

Одним з основних напрямків механіки руйнування композитів слід вважати прогнозування тріщиностійкості, статичної і циклічної міцності композита. Більшість компо-

зитів створюється на основі високоміцних армуючих елементів і матриці, що володіє достатньо високим ступенем деформативності. При руйнуванні армуючого елемента або при пошкодженні межі розділу фаз відбувається перерозподіл напружень таким чином, що пошкодження локалізується у відносно малому обсязі. Завдяки цьому ефективна міцність композита в цілому практично не знижується, що є одним з його переваг у порівнянні з традиційними матеріалами. Схеми руйнування композитів, що враховують взаємодію між процесом накопичення мікропошкоджень і фінальним руйнуванням, наведені на рис. [1]. У початковому стані в композитах є початкові дефекти тієї ж природи, що і мікропошкодження. Після прикладання навантаження, включаючи експлуатаційне, відбувається або крихке руйнування зразка, або йде процес накопичення мікропошкоджень.

Дефектоскопія шаруватих конструкцій пов'язана в основному з визначенням дефектів технологічного профілю, однак дослідження експлуатаційних дефектів, а також дефектів, що виникають у процесі механічного оброблення, особливо для конструкцій багаторазового використання або тривалого зберігання, також є актуальними.

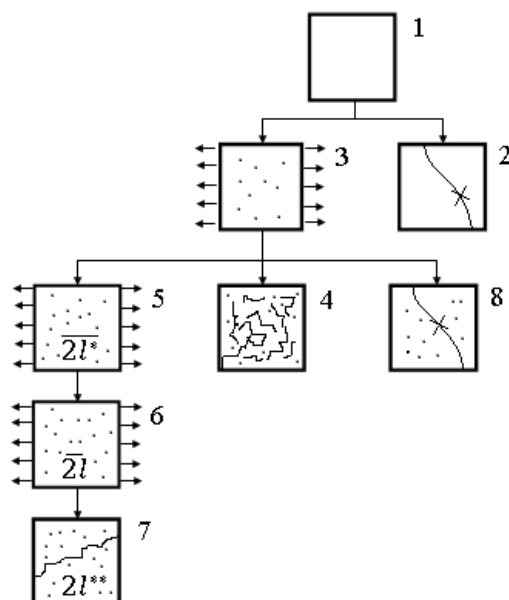


Рис. Схеми етапів руйнування композитів:

1 – початковий стан; 2 – крихке руйнування; 3 – накопичення мікропошкоджень; 4 – руйнування внаслідок втрати цілісності; 5 – утворення макроскопічної тріщини; 6 – зростання макроскопічної тріщини;

7 – фінальне руйнування в результаті зростання макроскопічної тріщини; 8 – крихке руйнування як результат накопичення мікропошкоджень; \* – характерний розмір зародкової тріщини;

\*\* – критичне значення тріщини

Технологія неруйнівного контролю конструкцій з шаруватих композитів визначається декількома параметрами, серед яких важливе місце займають габарити виробу, товщина силової оболонки, стан поверхні виробу та особливості технології виготовлення та оброблення. Контроль суцільності силової оболонки великого діаметра за технологією суттєво відрізняється від досліджень дефектів у виробках малого розміру. Оскільки проведення нерозривно вирішального контролю не гарантує якості всього обсягу виробів, такий контроль необхідний на стадії відпрацювання технології виготовлення для ідентифікації типів дефектів або у випадку, коли не існує інших методів контролю якості. Поряд з контролем якості вирішується і багато завдань по прогнозуванню властивостей і параметрів конструкції, а також щодо можливих причин відмови виробів при експлуатації. Оскільки методи неруйнівного контролю не є універсальними і кожен з них має свою область найбільш ефективного застосування, необхідно визначити головне спрямування

їх застосування: контроль виробів з певного матеріалу чи пошук дефектів певного виду. Для дефектоскопії шаруватих конструкцій можна застосовувати різні методи неруйнівного контролю, що базуються на певних фізичних явищах [1].

Магнітний метод. Визначає розсіювання магнітних полів різними дефектами в деталях будь-яких форм і розмірів феромагнітних матеріалів, які можуть суттєво змінити свої магнітні характеристики під впливом зовнішнього поля. Для матеріалів, що не володіють феромагнітними властивостями, цей метод контролю неприйнятний, тому для виробів з полімерних композиційних матеріалів він не використовується.

Електричний метод. Реєструє в контрольованому об'єкті електричне поле, створюване або безпосередньою дією на нього електричного поля, або опосередковано – за допомогою впливу збуреннями неелектричної природи. Як первинний інформативний параметр використовують електричні характеристики об'єкта контролю. Електричними методами можна визначати вміст компонентів у гетерогенних системах, вологість, ступінь полімеризації і старіння, поперечні розміри лінійно-протяжних діелектричних виробів, локалізацію провідних і непровідних включень у структурі шаруватого пакета.

Тепловий неруйнівний контроль. Виявляє теплові (температурні) поля контрольованого об'єкта. Температурне поле поверхні служить джерелом інформації про особливості теплопередачі, які, у свою чергу, залежать від наявності внутрішніх або зовнішніх дефектів: раковин, порожнин, тріщин, непроварів, іноридних включень і т. д. Основним інформаційним параметром цього методу є локальна різниця температур між дефектною і бездефектною областями об'єкта. Перепад температур на різних ділянках контрольованого об'єкта є функцією більшого числа факторів як внутрішніх, так і зовнішніх. Внутрішні фактори визначаються теплофізичними властивостями контрольованого об'єкта і дефекту, а також їх геометричними параметрами. До зовнішніх факторів належать характеристики процесу теплообміну на поверхні об'єкта контролю, потужність джерела нагрівання і швидкість його переміщення уздовж об'єкта. Знак перепаду залежить від співвідношення теплофізичних властивостей дефекту, виробу і досліджуваної поверхні. Методами теплового контролю можна виявити такі дефекти, як пропуски армуючих ниток у каркасах, порівняно великі сторонні включення. Однак ці методи не дозволяють виявляти дрібні структурні дефекти, оскільки геометрично роздільна здатність сучасної апаратури становить приблизно 0,5 мм.

Вихрострумний метод. Аналізує взаємодію зовнішнього електромагнітного поля з електромагнітним полем вихрових струмів, що створюються в електропровідних об'єктах контролю. Через відсутність електропровідних властивостей цей метод не застосовний для контролю виробів із шаруватих композиційних матеріалів [1; 3; 4].

Радіотехнічні методи (радіохвильовий і радіоспектроскопічний). Широко застосовуються для контролю якості виробів з полімерних композиційних матеріалів. Радіохвильовий метод базується на використанні явищ відображенні і загасанні радіохвилі, пов'язаних з наявністю дефектів у контрольованому виробі, радіоспектроскопічний – на використанні залежності резонансних явищ у матеріалах від їх складу, структури та в багатьох випадках – від форми виробу. Це дозволяє контролювати появу дефектів дуже малих розмірів, аж до декількох десятків міжатомних відстаней.

Оптичний метод. Аналізує взаємодії оптичного випромінювання з об'єктом контролю. Інформаційними параметрами цього методу є просторово-часові розподіли його амплітуди, фази, поляризації і ступеня когерентності.

Метод інфрачервоної дефектоскопії. Отримав широке застосування. Заснований на відмінності теплопровідності у якісного і дефектного матеріалу. Він застосовується для виробів, що мають доступ як із зовнішнього боку, так і зсередини. Метод дозволяє ви-

значати такі дефекти у шаруватих композитах: порожнечі, відшарування, пори, тріщини, чужорідні вclusions, відхилення від заданої геометричної форми.

Акустичний метод. Реєструє параметри пружних коливань, що створюються у досліджуваному об'єкті. Він дозволяє контролювати суцільність композиційних матеріалів, якість зварних і клеєних з'єднань. Точність вимірювань становить від 3 до 8 % від еквівалентної або умовної чутливості, що задається еталонними відбивачами. Акустичні методи дуже критичні до форми контрольованих об'єктів (сферичні, конічні) невеликих розмірів. Нині для визначення міцності склопластикових корпусів тиску застосовуються методи продзвону, засновані на реєстрації та аналізі характерного потріскування матеріалу стінки корпусу при гідростатичному навантаженні.

Радіаційні методи. Засновані на взаємодії іонізуючого випромінювання з контрольованим об'єктом та реєстрації пройденого через об'єкт випромінювання. Залежно від способу детектування дефектоскопічної інформації розрізняють радіографічний, радіоскопічний і радіометричний методи контролю. У першому випадку радіаційне зображення контрольованого об'єкта перетворюється в радіографічний знімок. Радіаційна інтроскопія заснована на перетворенні радіаційного зображення контрольованого об'єкта у світлове зображення на екрані радіаційно-оптичного перетворювача. Радіометрична дефектоскопія перетворює радіаційне зображення в електричні сигнали, подальший аналіз яких реалізується сучасними методами. Найбільш здійсненим з усіх радіаційних методів є метод обчислювальної томографії. Основні переваги методу обчислювальної томографії полягають у тому, що зображення внутрішньої структури об'єкта відтворюється без накладення тіней, тому його чутливість до зміни щільності на порядок вище, ніж у традиційних методів радіаційного контролю.

#### *Ультразвукова діагностика полімерних композиційних матеріалів*

Найбільше застосування при контролі якості виробів з композиційних матеріалів знайшли методи ультразвукової дефектоскопії, які дозволяють виявити розриви армуючих волокон, бульбашки повітря і скупчення смоли при контролі виробів різноманітної форми.

Композиційні речовини схильні до старіння, тобто їх властивості (наприклад, пружні модулі) змінюються з часом під дією навантажень. Зміни модулів можуть досягати 20-25 % від їх початкових значень. Отже, для контролю процесу старіння необхідно правильно і з високою точністю вимірювати пружні характеристики композитів. Стандартні механічні методи дослідження пружних властивостей таких середовищ, однак малоефективні через свою громіздкість. Оскільки пружні модулі твердих тіл однозначно визначають фазові швидкості акустичних хвиль, для вимірювання модулів доцільно використовувати більш точні – ультразвукові методи.

Експериментально дослідження пружних характеристик композитів проводилися неодноразово. В роботі [4] використовувалася стандартна іммерсійна техніка. Було показано, що в композитах такої структури при поширенні акустичної хвилі в напрямку  $k$ , існує одна квазіповздовжня і дві квазіпоперечні хвилі. Проте ця методика вимірювань, що використовує п'єзоелектричні джерела ультразвуку, володіє істотними недоліками.

Іммерсійна методика заснована на вимірюванні часової затримки між опорним звуковим сигналом, що пройшли іммерсійне середовище, і досліджуваним сигналом, що пройшли зразок. Тому необхідно, щоб імпульси квазіповздовжньої і квазіпоперечної хвиль були розділені в часі. Ця обставина, у свою чергу, обмежує мінімальну товщину зразків. Допустима товщина може змінюватися тільки в межах декількох міліметрів.

Можливе використання іншої методики вимірювань фазових швидкостей акустичних хвиль у композитах. Вона ґрунтується на вимірюванні коефіцієнта дворазового відображення УЗ хвиль від поверхні композита в прямому і зворотному (після відбиття від цилі-

ндричної стінки кювети) напрямках. Результати експериментів були представлені у вигляді залежностей коефіцієнтів відображення від кута падіння акустичних хвиль на поверхню зразків у різних перетинах композита і переліченим за цими даними залежностям фазових швидкостей УЗ хвиль у тих же осях і в тих же перерізах. Однак перші зі згаданих залежностей мали сильно порізану структуру, що можна було пояснити тільки великою помилкою проведених вимірювань. Крім того, зміна кутового спектра за рахунок віддзеркалення від циліндричної поверхні робить інтерпретацію результатів дворазового відображення ультразвуку від зразка неоднозначною. Зазначені проблеми можуть бути подолані з використанням лазерних джерел ультразвуку. Дослідження розповсюдження УЗ хвиль у композитах вироблялося при сфокусованому лазерному опроміненні поверхні [5]. Проте в цьому випадку можуть бути визначені тільки групові швидкості і розрахунок пружних модулів стає серйозною проблемою. Таким чином, для вирішення завдання дослідження поширення пружних хвиль у композитах з метою отримання повного набору пружних модулів і побудови адекватної механічної моделі таких середовищ необхідно більш точно вимірювання кутових залежностей фазових швидкостей УЗ хвиль у широкому діапазоні частот для зразків довільної товщини.

Внаслідок того, що типові пошкодження структури композита, такі як розриви волокон, мікротріщини, пори в з'єднанні, відшарування волокон від зв'язуючого і т. п. призводять до зміни загасання ультразвуку, одним з найбільш поширених методів неруйнівного контролю композитів є ультразвуковий. Для отримання надійної інформації про характер дефектів структури необхідні вимірювання спектральних характеристик у широкій смузі частот, тому що розсіювання ультразвуку на мікронеоднорідності відбувається тільки на довжинах хвиль, порівнянних з їх розмірами. Тому в більшості методів ультразвукового контролю використовується імпульсне випромінювання. Однак застосування традиційних п'єзоелектричних перетворювачів для генерації потужних ширококутових зондувальних імпульсів утруднено передусім через низьку ефективність п'єзогенерації ширококутових акустичних сигналів. Для отримання потужних ширококутових ультразвукових імпульсів у методиках неруйнівних досліджень композитів пропонується використовувати лазерне термооптичне збудження звуку. За частотної залежності коефіцієнта загасання ультразвуку в досить широкому спектральному діапазоні можна оцінити характерні розміри неоднорідностей структури. Трансформація спектрів загасання ультразвуку в композитах при втомних зміни структури дає можливість оцінити його залишковий ресурс. З використанням таких джерел була запропонована й експериментально реалізована [4] методика ширококутової акустичної спектроскопії неоднорідних конструкційних матеріалів. Ця методика дозволяє отримувати частотні залежності коефіцієнта загасання і швидкості ультразвукових хвиль у зразку в спектральному діапазоні імпульсів лазерного джерела ультразвуку та дослідити трансформацію цих залежностей при різних змінах структури зразків. Наприклад, було виявлено вплив втомних пошкоджень структури склопластикових композитів, що виникли при циклічних і статичних навантаженнях, на частотні залежності коефіцієнта загасання ультразвуку в спектральному діапазоні 1÷20 МГц. Отже, застосування в неруйнівному контролі та діагностиці композитів лазерного збудження ультразвуку є доцільним і перспективним.

**Висновки.** У статті розглянуто проблему неруйнуючої дефектоскопії виробів з композиційних матеріалів, зокрема під час виготовлення, експлуатації та механічного оброблення. Наведений аналіз існуючих на наш час методів контролю, зокрема тінювий, імпедансний, велосиметричний, радіографічний, СВЧ-метод, метод емісії хвиль напружень, метод фотопружності покриттів. Велика увага при виробництві та обробленні конструкцій КМ приділяється тріщиностійкості, а також запобіганню розшарування матеріалу.

Дефектоскопія шаруватих конструкцій пов'язана в основному з визначенням дефектів технологічного профілю, однак дослідження експлуатаційних дефектів, а також дефектів, що виникають у процесі механічного оброблення, особливо для конструкцій багаторазового використання або тривалого зберігання, також є актуальними, бо накопичення мікропошкоджень може призвести до руйнування матеріалу, що значно знижує якість конструкції та її експлуатаційні властивості.

Для неруйнуючої дефектоскопії КМ застосовуються методи, інформативність яких залежить від товщини зразка, якості поверхні тощо. Деякі з наведених методів не застосовуються в композитах, через відсутність у них феромагнітних властивостей. Найбільш розповсюдженим нині є застосування ультразвукового контролю, подальше дослідження якого є надалі перспективним.

#### Список використаних джерел

1. Буров А. Е. Моделирование разрушения и трещиностойкость волокнистых металлокомпозитов / А. Е. Буров, И. И. Кокшаров, В. В. Москвичев. – Новосибирск : Наука, 2003. – 176 с.
2. Импульсная акустическая спектроскопия с лазерным источником звука / А. А. Карабутов, М. П. Матросов, Н. Б. Подымова, В. А. Пыж // Акуст. журн. – 1991. – Т. 37 (2). – С. 311-321.
3. *Неразрушающие* методы и средства контроля качества изделий и конструкций из неметаллов. – Л. : ЛДНТП, 1982. – 87 с.
4. *Потапов А. И.* Неразрушающий контроль качества изделий из стеклопластиков / А. И. Потапов, Г. Л. Баранов. – Л. : ЛДНТП, 1970. – 46 с.
5. *Scott W. R., Gordon P. F.* Ultrasonic spectral analysis for nondestructive testing of layered composite materials // J. Acoust. Soc. Am. – 1984. – Vol. 62 (1). – P. 108.